

Marko Ahomies

## Kallioon injektoitu ja ankkuroitu porapaalu





Marko Ahomies

# Kallioon injektoitu ja ankkuroitu porapaalu

Opinnäytetyö 5/2016

Liikennevirasto

Helsinki 2016

*Kannen kuva: Marko Ahomies*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN 2343-1741  
ISBN 978-952-317-229-6

Liikennevirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelin 0295 34 3000



**Marko Ahomies: Kallioon injektoitu ja ankkuroitu porapaalu.** Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2016. Opinnäytetyö 5/2016. 137 sivua ja 3 liitettä. ISSN 2343-1741, ISBN 978-952-317-229-6.

**Avainsanat:** porapaalu, ankkurointi, injektointi, kallioankkuri

## Tiivistelmä

Porapaaluille perustetut rakenteet ovat yleistyneet rakentamisen siirtyessä yhä haastavampiin pohjaolosuhteisiin. Porapaaluille perustettuihin rakenteisiin kohdistuu toisinaan vetojännityksiä. Vetojännitysten suuruus vaihtelee suuresti rakennuskohteesta riippuen. Nykyisellään vetojännitykset siirretään kallioon, niiden suuruudesta riippumatta, varsin järein rakentein.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko rakenteisiin kohdistuvat vetojännitykset vastaanottaa turvallisesti kallioon vaipaltaan injektoidun ja ankkuroidun porapaalun välityksellä. Tutkimuksen tavoitteena oli myös yhtenäistää kallioankkuroinnin mitoituskäytäntöjä ja antaa perusteita rakenteen mitoittamiselle.

Työ aloitettiin kirjallisuustutkimuksella, jossa käytiin läpi nykyisiä suunnittelu- ja toteutusohjeita sekä toteutettujen kohteiden suunnitelmia. Työtä jatkettiin urakoitsijoille sekä suunnittelijoille suunnatulla haastattelututkimuksella. Tämän jälkeen selvitettiin kokeellisella tutkimuksella kallioon vaipaltaan injektoidun porapaalun vetokestävyyttä.

Kokeellisessa tutkimuksessa koekuormitettiin vaipaltaan kallioon injektoituja porapaaluja. Koekuormitusten tulosten perusteella rakenteella on mahdollista vastaanottaa pienehköjä vetokuormia. Murtotapa koekohteella oli paaluputken ja injektointiaineen välisen teräs-laasti –tartunnan pettäminen. Avarrinkruunun tyypillä oli suuri vaikutus maksimikuorman suuruuteen. Mekaanisen tartunnan tarjoavalla rengasteräsettimallin avarrinkruunulla saavutettiin huomattavasti suurempi maksimikuorma kuin irtorengasterämällä.

Työssä tehtyjen laskennallisten tarkastelujen perusteella kallioon injektoimalla ankkuroidun porapaalun laskennallista vetokestävyyttä rajoittaa kalliokartion paino paalukoosta riippuen vähintäänkin 3 m poraussyvyyteen saakka. Nykyisen ohjeistuksen mukaan kallionpinnan päällä olevien maakerrosten painoa ei huomioida kalliokartion painoa määritettäessä. Tehtyjen tarkastelujen perusteella maakerrosten huomioiminen kuitenkin lisäisi kalliokartion painoa huomattavasti jo ohuillakin maapeitteen paksuuksilla. Näin ollen kalliokartion mitoittava vaikutus vähenisi selvästi.

Koekuormitusten mittaustulosten sekä koekohteella tehtyjen silmämääräisten havaintojen perusteella vaipaltaan kallioon injektoidun porapaalun vetokestävyyttä rajoittaa teräs-laasti –tartunnan kestävyys. Jatkotutkimuksena tälle työlle tulisi selvittää, voidaanko tartuntaa parantaa lisäämällä paaluputken ulkopintaan mekaanista tartuntaa.

**Marko Ahomies: Mantelinjekterade borrhålar.** Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2016. Lärdomsprov 5/2016. 137 sidor och 3 bilagor. ISSN 2343-1741, ISBN 978-952-317-229-6.

## Sammanfattning

Konstruktioner med borrhålar har blivit vanligare i takt med att byggandet utvidgats till alltmer krävande grundförhållanden. Konstruktioner som grundlagts med borrhålar utsätts ibland för dragbelastning. Dragbelastningens styrka varierar betydligt beroende på byggnadsobjekt. I dagens läge överförs dragkrafter till berggrunden med relativt grova konstruktioner, oberoende av krafternas styrka.

Syftet med denna undersökning var att utreda huruvida dragbelastning som riktas mot konstruktionerna kan tas emot säkert med en mantelinjekterad borrhåle. Ett ytterligare mål för undersökningen var att göra dimensioneringsförfarandena för förankring vid berggrunden enhetligare och skapa grunder för dimensioneringen av konstruktionen.

Arbetet inleddes med en litteraturundersökning av existerande planerings- och bygganvisningar samt av planer för byggda objekt. Arbetet fortsatte med en intervjuundersökning med entreprenörer och projekterare. Efter detta undersöktes draghållfastheten av borrhålar som mantelinjekterats i berggrunden genom experiment.

I experimenten provbelastades borrhålar som mantelinjekterats i berggrunden. Resultaten av provbelastningarna visar att det är möjligt att ta emot mindre dragkrafter med denna konstruktion. I provobjekten gav konstruktionen i typiska fall vika genom att vidhäftningen mellan stål och bruk, dvs. mellan pålröret och injektionsämnet, gav efter. Borrkronans typ hade stor betydelse för maximilastens storlek. Med en ringborrkronesats som ger mekanisk vidhäftning uppnåddes en betydligt större maximilast än med en ringborrmodell med fristående ringar.

Utifrån de kalkylmässiga studier som gjordes i arbetet begränsas draghållfastheten av en i berggrunden mantelinjekterad borrhåle av bergskonens vikt till minst 3 meters borrhåldjup, beroende på pålens storlek. Enligt nuvarande riktlinjer beaktas inte tyngden av jordlager som ligger på berggrunden vid fastställande av bergskonens tyngd. Utifrån de gjorda studierna skulle bergskonens tyngd betydligt öka redan i fråga om tunna jordlager, om jordlagren beaktades. Detta innebär att bergskonens dimensionerande inverkan skulle minska betydligt.

Utifrån mätresultaten av provbelastningarna och de okulära observationer som gjordes vid provobjektet begränsas draghållfastheten av mantelinjekterade borrhålar av hållbarheten av vidhäftningen mellan stålet och bruket. Som en fortsättning på detta arbete borde det utredas huruvida det är möjligt att förbättra vidfästningen genom att öka den mekaniska vidhäftningen av pålrörets utsida.

**Marko Ahomies: The grouted and anchored drilled pile in the bedrock.** Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2016. Theses 5/2016. 137 pages and 3 appendices. ISSN 2343-1741, ISBN 978-952-317-229-6.

## Summary

The drilled pile foundations have become more common when construction has moved to more challenging ground conditions. Sometimes the drilled pile foundations are on countering tensile stresses. The magnitude of tensile stresses vary a lot depending on constructions. Nowadays the tensile stresses are transferred to the bedrock with heavy-duty structures.

The focus of this thesis was to study if tensile stresses of structures can receive safely with anchored and grouted drilled piles in the bedrock. The focus of the thesis was to standardize instructions for anchored piles for dimensioning and offer bases for dimensioning of rock anchored structures.

The thesis was started with literary research which contains present design instructions and designs of realizable structures. The thesis was continued with an interview which was aimed at contractors and designers. After that an experimental research was conducted where pulling resistance of anchored and grouted drilled piles in the bedrock was studied.

In the experimental research piles were drilled and grouted into the bedrock and then loaded in tension. Based on the results it is possible to receive quite small tensile loads. The failure mechanism at the test target was occurred between steel and grout. The ring bit model had a big effect on the size of maximum loads. With ring bit set model significantly higher maximum loads was received than a separate ring bit model.

Based on design calculations, the pulling resistance of anchored and grouted drilled pile is limited to the weight of a rock cone when a depth of drilling is less than 3 m. The weight of soil mass above the rock cone is not taken into account in present design practice. Based on calculations of this thesis, already a thin layer of ground would increase significantly the weight of rock cone. Thus the limiting effect of rock cone is reduced clearly.

Based on the strength of results and visual observations at the test site, the size of pulling load is limited to adhesion between steel and grout. As a further study of this thesis one should clarify if an adhesion between steel and grout can be improved by adding a mechanical adhesion to the outer surface of the pile.

## Esipuhe

Liikenneviraston taitorakenteita perustetaan usein porattaville teräsputkipaaluille. Rakenteesta ja kuormitustilanteesta johtuen porapaaluihin voi kohdistua vetokuormia ja nykyisen suunnittelu- ja toteutuskäytännön mukaisesti vetokuormat niiden suuruudesta huolimatta siirretään kokonaan paalun sisälle ja alapuolelle asennettavalla ankkurilla kallioon.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko rakenteisiin kohdistuvat vetojännitykset vastaanottaa turvallisesti kallioon vaipaltaan injektoidun ja ankkuroidun porapaalun välityksellä ilman erillistä ankkuria. Tarkoituksena oli myös selvittää millä tavoin injektointi tulisi suorittaa ja mitä eroja erilaisilla injektointitavoilla ja porapaalun kärkikappaleilla on injektoinnin onnistumiseen, luotettavuuteen ja kestävyys.

Tutkimus toteutettiin sekä teoreettisena tutkimuksena että mittavana kokeellisena tutkimuksena pilottikohteella Ylivieskassa.

Tutkimusta tullaan käyttämään taustadokumenttina, kun Liikenneviraston ohjeistusta porapaalujen paalun alapään jäykkyyden ja vetokestävyysden osalta päivitetään.

Tutkimus oli Tampereen Teknillisen Yliopiston opiskelijan Marko Ahomiehen diplomityö, ja sen rahoittajina toimivat Liikennevirasto ja Ruukki Construction Oy (nythetmin SSAB Europe Oy). Atlas Copco Rotex Oy osallistui projektin rahoitukseen toimitamalla porapaalujen porakruunut työssä toteutettuun pilottikohteeseen.

Diplomityön ohjausryhmässä toimivat seuraavat henkilöt:

- Tim Länsivaara, Tampereen Teknillinen Yliopisto (työn valvoja)
- Juho Mansikkamäki, Ramboll Finland Oy (työn ohjaaja)
- Antti Perälä, SSAB Europe Oy (työn ohjaaja)
- Veli-Matti Uotinen, Liikennevirasto (työn ohjaaja)

Helsingissä helmikuussa 2016

Liikennevirasto  
Tekniikka ja ympäristö -osasto

# Sisällysluettelo

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT .....	10
LYHENTEET JA MERKINNÄT .....	12
1 JOHDANTO .....	13
2 PORAPAALUTUS-, ANKKUROIINTI- JA INJEKTOINTIMENETELMÄT .....	14
2.1 Porapaalu .....	14
2.1.1 Porapaalutyypit .....	14
2.1.2 Porauskalusto .....	17
2.1.3 Porausmenetelmät .....	19
2.2 Kallioankkuri .....	23
2.2.1 Ankkurityypit ja materiaalit .....	23
2.2.2 Asentaminen .....	24
2.3 Injektointi .....	24
2.3.1 Injektointimenetelmät .....	25
2.3.2 Injektointiaineet .....	28
2.3.3 Injektointikalusto .....	31
2.3.4 Injektointipaine .....	32
2.3.5 Injektoinnin lopetuskriteeri .....	34
3 NYKYISET PORAPAALUJEN INJEKTOINTIIN JA ANKKUROIINTIIN LIITTYVÄT SUUNNITTELU- JA TOTEUTUSOHJEET .....	35
3.1 Suunnittelun lähtötiedot .....	35
3.1.1 Pohjatutkimukset .....	35
3.1.2 Vaativuusluokitus .....	37
3.2 Porapaalu .....	38
3.2.1 Poraussyvyys kallioon .....	38
3.2.2 Paalun vetokestävyys .....	38
3.2.3 Korroosio .....	44
3.2.4 Paalun alapään momenttijäykkyys .....	46
3.2.5 Vanha ohjeistus .....	46
3.3 Kallioankkuri .....	47
3.3.1 Rakenteellinen kestävyys .....	47
3.3.2 Kalliojuotoksen kestävyys .....	47
3.3.3 Kalliokartion paino .....	48
3.3.4 Koeveto .....	50
3.3.5 Korroosio .....	51
4 TOTEUTETTUJA KOHTEITA .....	53
4.1 Raahen tuulivoimala .....	53
4.2 Sirkkalan silta, Joensuu .....	55
4.3 Lauttasataman lauttapaikka, Norrskata .....	57
4.3.1 Maatuki .....	57
4.3.2 Tukitihtaalit .....	59
4.4 Kuokkalankosken ratasilta .....	61
4.5 Täyttökanavan silta S3, Ilmajoki .....	63
4.6 Hanasaaren lämpökeskuksen piippu .....	65
4.7 Toimitilarakennus, Technopolis Ruoholahti .....	67
4.8 Ankkuroinnin liittyminen yläpuoliseen rakenteeseen .....	68

4.9	Havaintoja toteutettujen kohteiden suunnitelmista .....	71
4.10	Vaihtoehtoiset ratkaisut .....	71
5	HAASTATTELUTUTKIMUS.....	73
5.1	Tutkimuksen toteutus .....	73
5.2	Haastattelututkimuksen sisältö .....	73
5.3	Suunnittelijoiden vastauksia .....	74
5.4	Urakoitsijoiden vastauksia.....	75
6	KUSTANNUSTARKASTELU.....	77
6.1	Lähtötiedot.....	77
6.2	Kustannusvertailu.....	78
7	LASKENNALLISET TARKASTELUT .....	81
7.1	Vetokestävyys.....	81
7.1.1	Porapaalut.....	81
7.1.2	Kallioankkurit .....	83
7.1.3	Maapeitteen paksuuden vaikutus kalliokartion painoon .....	84
7.2	Momenttijäykkyys.....	85
8	KOEKOHDEN YLIVIESKASSA.....	86
8.1	Kohteen esittely .....	86
8.1.1	Sijainti.....	86
8.1.2	Pohjatutkimukset .....	86
8.1.3	Pohjaolosuhteet.....	87
8.2	Työn suoritus.....	88
8.2.1	Paalujen poraus .....	88
8.2.2	Paalujen huuhtelu.....	91
8.2.3	Paalujen injektointi .....	92
8.2.4	Kaivuvaihe .....	100
8.2.5	Kuormitusrakenteet .....	101
8.2.6	Koekuormitusvaihe .....	102
8.3	Koestuksen tulokset .....	105
8.3.1	Murtokuormat .....	105
8.3.2	Maksimikuormat .....	110
8.3.3	Kallionpinnan siirtymät.....	112
8.3.4	Injektointiaineen levittyminen.....	116
8.4	Havaintoja koestuksen tuloksista.....	117
8.4.1	Murtomekanismi .....	117
8.4.2	Tartuntalujuus.....	120
8.4.3	Tulosten vertailu laskennallisiin tarkasteluihin.....	122
8.4.4	Puristuslujuus .....	124
8.5	Koekohteen epävarmuustekijöitä .....	128
9	VAIPALTAAN INJEKTOIDUN PORAPAALUN KÄYTTÖKELPOISUUS .....	129
9.1	Haasteet.....	129
9.1.1	Porausvaihe .....	129
9.1.2	Huuhteluvaihe .....	129
9.1.3	Injektointivaihe .....	130
9.2	Ehdotetut vaatimukset suunnittelulle, toteutukselle ja laadunvalvonnalle ....	131
10	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	132

LÄHTEET .....	134
---------------	-----

#### LIITTEET

Liite 1	Injektointipöytäkirja
Liite 2	Voima-siirtymä –kuvaajat
Liite 3	Kallionpinnan siirtymät



## Termit ja niiden määritelmät

<b>Avarrinkruunu</b>	Porakruunu, joka pyörii yhdessä pilottikruunun kanssa laajentaen pilottikruunun aikaansaamaa maa-/kallioreikää.
<b>Betoni</b>	Veden, sementin ja kiviaineksen ( $d_{\max} \geq 16$ mm) seos.
<b>Injektointiaine</b>	Nestemäinen seos, joka yleensä sisältää sementtiä ja vettä sekä mahdollisia apuaineita tai rajoitetun määrän runkoaineita ( $d_{\max} < 2$ mm) ja joka siirtää kuormaa kantavasta elementistä tai paalun varresta kallioperään ja edistää korroosiosuojausta
<b>Injektoitava maakenkä</b>	Koekohteella käytetty maakenkämalli, johon on tehty injektointiurat porapaalun injektointia varten.
<b>Irtorengasmalli</b>	Avarrinkruunun tyyppi, jossa rengasteräavarrinkruunua ja maakenkää ei ole kiinnitetty mekaanisesti.
<b>Juotosbetoni</b>	Veden, sementin ja hienorakeisen runkoaineksen ( $d_{\max} < 16$ mm) seos.
<b>Juotoslaasti</b>	Veden, sementin ja hienorakeisen runkoaineksen ( $d_{\max} < 4$ mm) seos.
<b>Kallioankkuri</b>	Rakenne, joka välittää yläpuoliselta rakenteelta kohdistuvat vetokuormitukset kallioon.
<b>Kalliokartio</b>	Kalliomassa, joka voi teoreettisesti nousta leikkautumatta kallioista. Kalliokartion koko määritetään porapaalun/kallioankkurin kallioon asennussyvyyden sekä kalliokartion kärkikulman mukaan.
<b>Kalliorako</b>	Avarrinkruunun aikaansaama paalun ja kallion välinen rako.
<b>Maakenkä</b>	Paalun päähän kiinnitetty osa, joka välittää porakruunun voimavaikutuksen paaluputkelle.
<b>Maksimikuorma</b>	Suurin vetokuorman arvo, joka saavutettiin kunkin paalun vetokuormituksessa koekohteella.
<b>Mansetti</b>	Koekohteella porapaalujen injektoinnissa käytetty 6 m pitkstä teräsputkesta sekä kahdesta hydraulisesti kiristettävästä tiivistinosasta koostuva injektointiputki.
<b>Murtokuorma</b>	Vetokuorman arvo, joka saavutettiin ennen teräs-laastitartunnan pettämistä koekohteella.
<b>Paalu</b>	Hoikka maassa oleva rakenneos, joka siirtää kuormia kallioon tai kantavaan maakerrokseen.

<b>Paalun vaippa</b>	Paalun varren ja maan/kallion kontaktipinta.
<b>Pilottikruunu</b>	Porakruunu, joka hienontaa maa-/ kallioainesta paaluputken edellä.
<b>Porapaalu</b>	Paalu, joka asennetaan maahan tai kallioon poraamalla.
<b>Porapaalun injektointi</b>	Porapaalun ja kallion välisen kallioraon täyttäminen injektointiainella.
<b>Porasoija</b>	Porapaalun asennuksen yhteydessä syntyvä, porakruunun aikaansaama, hienojakoinen maa-/ kallioaines.
<b>RD-porapaalu</b>	SSAB:n teräsputkipaalu, joka asennetaan poraamalla vaativiin maaperä- ja ympäristöolosuhteisiin. Paalulla on mahdollista läpäistä kaikki luonnolliset maakerrokset sekä kallio.
<b>Rengasteräsettimalli</b>	Avarrinkruunun tyyppi, jossa rengasteräavarrinkruunu ja maakenkä on yhdistetty mekaanisesti yhdeksi kokoonpanoksi.
<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>	Porapaalu, jonka asennuksen yhteydessä syntynyt kalliorako täytetään injektointiaineella.
<b>Vedetty paalu</b>	Paalu, joka on suunniteltu ottamaan vastaan vetokuormia.

## Lyhenteet ja merkinnät

### Latinalaiset kirjaimet

$A_g$	Ankkuritangon bruttopoikkipinta-ala
$A_s$	Jännityspoikkipinta-ala kierteiden kohdalla
$d$	Porareiän halkaisija
$D$	Tartuntapituus kalliossa
$f_{ctk}$	Betonin/laastin vetolujuuden ominaisarvo
$f_{ua}$	Teräsankkurin vetolujuus
$F_{tt,Rd}$	Ankkureiden kierteiden vetokestävyys
$F_{t,d}$	Vetokuorman mitoitusarvo
$k_b$	Ankkurin pinnan muodosta johtuva tartuntakerroin
$L$	Juotospituus
$L_{min}$	Vaadittu ankkurointipituus
$m$	Mallikerroin
$P_d$	Vetokestävyyden mitoitusarvo
$P_{koeveto}$	Koevetovoima
$P_p$	Ankkurin koevetovoima
$P_{to,1}$	Ankkurin koevetovoima, joka vastaa 0,1 % venymää
$R_{ck}$	Porapaalun vaipan geotekninen kestävyys
$R_{ct}$	Juotoslaastin ja teräksen välinen tartunta
$R_{sk}$	Vetokestävyyden ominaisarvo
$R_{t,d}$	Vetokestävyyden mitoitusarvo
$s$	Pohjan sivu
$V_e$	Veden erottuminen
$V_i$	Injektointimassan tilavuus
$V_{tot}$	Massan ja veden tilavuus

### Kreikkalaiset kirjaimet

$\gamma_d$	Kallion tilavuuspaino
$\gamma'$	Tehokas tilavuuspaino
$\gamma_{st}$	Vetokestävyyden osavarmuusluku
$\gamma_{M2}$	Osavarmuusluku
$\gamma_R$	Osavarmuusluku
$\gamma_G$	Edullisen kuorman varmuuskerroin
$\sigma_1$	Suurin pääjännitys
$\sigma_3$	Pienin pääjännitys
$\xi$	Korrelaatiokerroin
$T_d$	Juotoksen tartunnan mitoituslujuus
$T_{kallio-kallio}$	Leikkauslujuuden ominaisarvo
$T_{s;k}$	Betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen ja kallion välinen ominais-tartuntalujuus
$\varphi$	Kalliokartion kärkikulman puolikas

# 1 Johdanto

Kallioon ankkuroituja porapaaluja käytetään säännöllisesti perustamisratkaisuisissa, kun paalun tulee kyetä välittämään sekä puristus- että vetojännityksiä. Vetojännityksiä syntyy tyypillisesti siltakohteissa jääkuormista, jarrukuormista ja törmäyskuormista sekä vinoköysi- ja riippusilloissa jo rakenteen omasta painosta. Muissa rakenteissa vetojännityksiä syntyy tyypillisesti mastomaisista kohteista, joita ovat mm. piiput sekä tuulivoimalat. Myös pumppaamoihin kohdistuu usein vetojännityksiä veden nosteesta johtuen.

Kallioon ankkuroitu porapaalu on vaativa rakenne, jonka suunnittelun ja toteutuksen ohjeistus on nykyisellään puutteellista. Tämä johtaa siihen, että pohjarakenne- sekä rakennesuunnittelija suunnittelevat jokaisen rakenteen tapauskohtaisesti, mikä on omiaan lisäämään toteutuksen monimuotoisuutta. Eri suunnittelijat käyttävät siis samanlaisissa tilanteissa erilaisia toteutustapoja ja jopa suunnitteluperusteita. Näin ollen riski huonosti toimivien rakenneratkaisujen päätyemisestä rakenteisiin kasvaa. Toisaalta puutteellinen ohjeistus voi ohjata suunnittelijan korvaamaan rakenteen vaihtoehtoisella, kalliimmalla ratkaisulla.

Toinen näkökulma kallioon ankkuroitujen porapaalujen käytölle on harvinaisen kuormitustapauksen aikaansaama pienehkö vetojännitys. Nykyisellään kuormitus siirretään kallioon varsin raskailla rakenteilla. Tämän työn tarkoituksena on löytää kevyempiä, mutta kuitenkin turvallisia ja pitkäikäisiä rakenteellisia vaihtoehtoja. Työn päättävänä tavoitteena on selvittää vaipaltaan injektoidun ja ankkuroidun porapaalun soveltuvuutta vetokuormituksen vastaanottamiseen.

Työn tavoitteena on kerätä suunnitelmia tehdyistä rakenteista sekä koota kokemuksia suunnittelijoilta ja urakoitsijoilta toteutetuista kohteista. Näiden perusteella koostetaan ehdotuksia rakenteista, joita porapaalun injektointiin ja ankkurointiin voidaan käyttää. Työn on tarkoitus yhtenäistää porapaalun kallioankkuroinnin toteutuskäytäntöjä ja antaa perusteita rakenteen mitoittamiselle. Lisäksi työ tarjoaa uutta tietoa porapaalun alapään injektoinnista, injektointimenetelmistä, injektoidun paalun vetokestävyyydestä, paalun alapään jäykkyydestä ja tarvittavasta poraussyvyyydestä kallioon sekä soveltuvuudesta pysyviin rakenteisiin. Tietoja hyödynnetään paalutuksiin liittyvien suunnittelu- ja toteutusohjeiden päivittämisessä.

Työ koostuu kirjallisuustutkimuksesta, haastattelututkimuksesta sekä kokeellisesta tutkimuksesta. Kirjallisuustutkimuksessa kootaan yhteen toteutettuja rakenneratkaisuja sekä suunnittelu- ja toteutusohjeita. Kirjallisuustutkimuksessa keskitytään Suomeen, Ruotsiin ja Norjaan. Haastattelututkimus kohdistetaan urakoitsijoille sekä suunnittelijoille. Kokeellisessa tutkimuksessa kuormitetaan vaipaltaan injektoituja porapaaluja vetokokeella. Kokeessa pyritään selvittämään, mitkä vaiheet työn suorituksessa ovat erityisen kriittisiä injektoinnin onnistumisen kannalta. Muuttujina kokeessa ovat injektointimenetelmä, avarinkruunun koko ja tyyppi sekä poraussyvyys kallioon.

Porapaalun alapään kiertojäykkyyttä on tutkittu Leo-Ville Miettisen diplomityössä 'The rotational stiffness and watertightness of RD pile walls in the bedrock and pile interface'. Työssä esitetään lisätutkimustarve kallioon asennettujen porapaalujen injektoinnin tarkemmalle selvittämiseksi. Erityishuomio tulisi kiinnittää injektointikanavan tukkeutumisen estämiseen sekä siihen, miten vesi-sementti-suhteen muutokset vaikuttavat injektointiaineen leviämiseen.

## 2 Porapaalutus-, ankkurointi- ja injektointimenetelmät

### 2.1 Porapaalu

Porapaalut soveltuvat erityisesti rakennuspaikoille, joissa on vaikeasti läpäistäviä maakerroksia kuten lohkareita, kiviä tai vanhoja perustusrakenteita. Porapaalut soveltuvat myös rakennuspaikkoihin, joissa ympäröivät rakenteet ovat herkkiä värinälle sekä maaperän painumille ja siirtymille. Porapaalut ovat varma valinta kohteissa, joissa paalujen on saavutettava tietty tunkeutumistaso. Mikäli kalliopinta on voimakkaasti viettävä, porapaaluja käyttämällä estetään paalujen liukuminen kalliopinnalla. (SSAB:n teräspaalut; Suunnittelu- ja asennusohjeet)

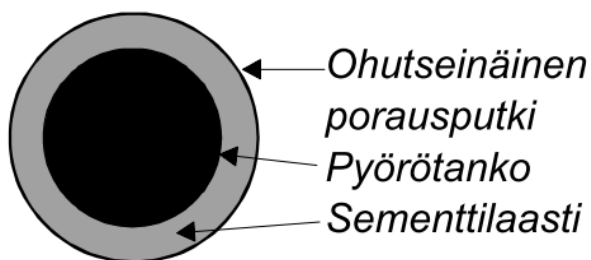
Porapaalut soveltuvat perustusrakenteisiin, joihin kohdistuu suuria keskittyneitä kuormituksia, joiden vuoksi maanvarainen perustus johtaa suureen anturaan ja suuriin maansiirtotöihin. Porapaaluilla, joissa teräsputki jää maahan, kyetään vastaanottamaan vetojännityksiä. Porapaalut soveltuvat myös paikkoihin, joissa paaluilta vaaditaan hyvää sijainti- ja kaltevuustarkkuutta. Suomessa porapaaluja käytetään lähes yksinomaan kallioon tukeutuvina tukipaaluina. (SSAB:n teräspaalut; Suunnittelu- ja asennusohjeet)

#### 2.1.1 Porapaalutyypit

Suomessa käytettävät porapaalutyypit ovat terässydänpaalu, porattava teräsputki-paalu sekä läpi-injektoitava porapaalu. Porattavassa teräsputkipaalussa porausputki voidaan joko jättää osaksi paalua tai nostaa porauksen jälkeen ylös. (TIEH2000002-001)

##### Terässydänpaalu

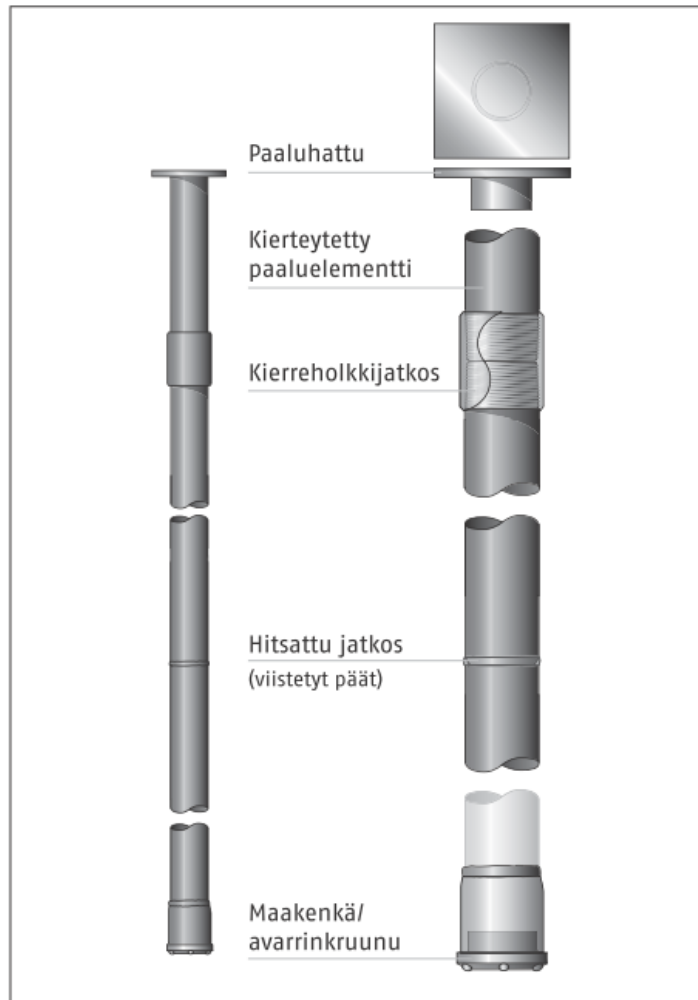
Terässydänpaalujen asennuksessa käytetään ohutseinäistä putkea. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään maaputkiporaus maaporauksen pilottikruunulla kallioon pintaan. Tämän jälkeen pilottikruunu nostetaan ylös, ja porausta jatketaan kalliokruunulla, joka ei upota porausputkea. Porauksen jälkeen kallioreikä ja suojaputki huuhdellaan, täytetään sementtilaastilla ja asennetaan pyörötanko. Terässydänpaalun poikkileikkaus on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1 Terässydänpaalun poikkileikkaus (TIEH2000002-001).

### Porattava teräspankkipaalu, jonka porausputki jää paalun osaksi

Teräspankku toimii porattaessa porausputkena ja valmiissa paalussa kantavana rakenteena ottaen vastaan suurimman osan paalukuormasta. Poraus tehdään samalla kalustolla sekä maahan että kallioon. Teräspankku huuhdellaan porauksen jälkeen ja raudoitetaan tarvittaessa.



Kuva 2 RD-pienpaalun rakenne (SSAB 2015).

SSAB:n valmistamat porattavat teräspankipaalut voidaan jatkaa joko holkillisella kartiokierre-jatkoksella tai hitsaamalla (kuva 2). Holkkijatkos soveltuu paalukoolle 115 – 220 mm. Holkkijatkos voi rajoittaa paalun vetokestävyyttä, mikä on huomioitava paalun vetokestävyyttä mitoitettaessa. (SSAB:n teräspankut; Suunnittelu- ja asennusohjeet)

### Porattava teräspankkipaalu, jonka porausputki nostetaan ylös

Teräspankku toimii porauksen ajan porausputkena. Porauksen jälkeen putki nostetaan ylös ja paalu raudoitetaan sekä betonoidaan.

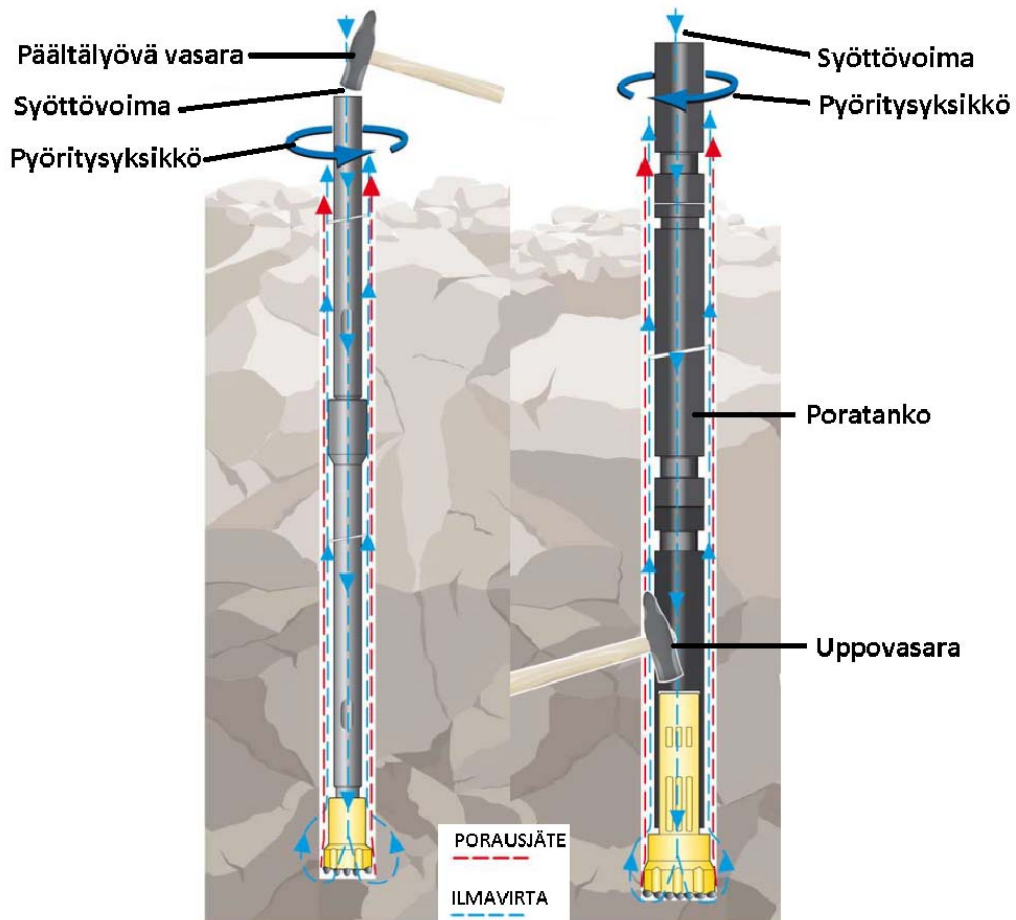




### 2.1.2 Porauskalusto

Suomessa porapaalujen asentamiseen käytetään iskeviä porausmenetelmiä, jotka perustuvat neljään pääkomponenttiin: syöttövoimaan, pyöritykseen, iskuun sekä huuhteluun. (TIEH2000002-001)

Porapaalujen asentamiseen käytettävä kalusto koostuu poravaunusta sekä joko uppoporauskalustosta tai päältälyövästä kalustosta (kuva 4). Molemmat porauskalustot soveltuvat sekä epäkeskiseen että keskiseen porausmenetelmään. (RIL 254-1-2011)



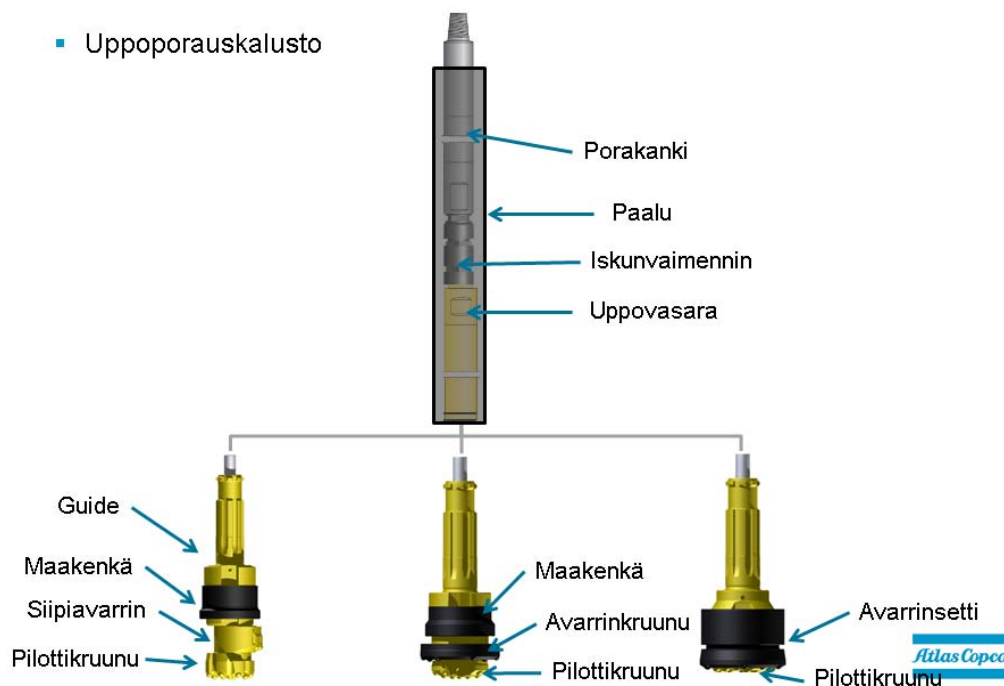
Kuva 4 Vasemmalla päältälyövä porauskalusto ja oikealla uppoporauskalusto. (Atlas Copco Rotex 1)

#### Päältälyövä kalusto

Päältälyövässä kalustossa iskuvasara on maanpinnalla, ja isku välittyy poratangoilla paalun alapäähän porakruunulle (kuva 5). Menetelmässä käytetään useimmiten hydraulivasaraa. Paalun halkaisija rajoittuu päältälyövä kalustoa käytettäessä 200 mm ja poraussyvyys normaalisti 30 m. Menetelmän etuna on se, että lyönti voidaan suunnata tarvittaessa myös ylöspäin. Tämä on tarpeellista, kun porausputkea nostetaan ylöspäin. Maan häiriintyminen on päältälyövä kalustoa käytettäessä vähäisempää. (RIL 254-1-2011; Viitala 2013)



### Uppoporauskalusto



Kuva 6 Uppoporausmenetelmässä käytettävä porauskalusto. Kuvasta puuttuu pyörityspää. (Atlas Copco Rotex 2, muokattu)

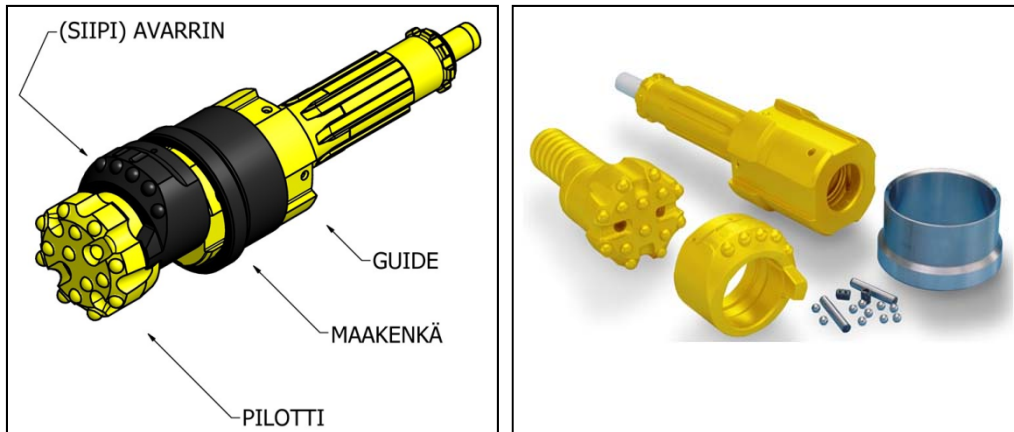
### 2.1.3 Porausmenetelmät

Porapaalun asennuksessa käytetään joko epäkeskistä tai keskistä porausmenetelmää.

#### Epäkeskinen porausmenetelmä

Epäkeskisessä porausmenetelmässä porauskaluston muodostavat pilottikruunu, epäkeskinen avarrinkruunu, maakenkä sekä guide (kuva 7). Epäkeskisessä porausmenetelmässä pilottikruunu tai guide pyörii ja lyö maakenkää terämällistä riippuen. Maakenkä, joka on hitsattu paaluputkeen kiinni, vetää paalua porauksessa mukanaan. Avarrinkruunu laajentaa pilottikruunun tekemää porausreikää porausputkea suuremmaksi. (Atlas Copco Rotex 2)

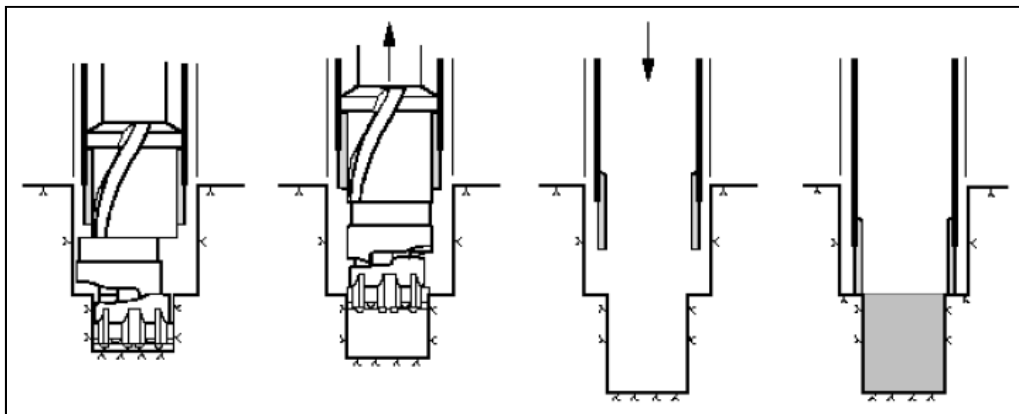
Epäkeskisessä porausmenetelmässä avarrinkruunu on pilottikruunun suhteen epäkeskinen. Avarrinkruununa käytetään siipiterää, joka liikkuu porattaessa epäsymmetrisesti pilottikruunuun nähden.



Kuva 7 Epäkeskisessä porausmenetelmässä käytettävä siipiavarrin, pilottikruunu, maakenkä sekä guide. (Atlas Copco Rotex 1)

Pilottikruunun kärjessä olevat reiät ovat huuhtelua varten. Niiden kautta pumpataan paineella joko ilmaa tai vettä. Näin paalu saadaan pidettyä tyhjänä maa-aineksesta. (Lehmusvirta 2006)

Poistettava maa poistuu osin porausputken ulkopintaa pitkin ja osin porausputken sisällä maanpinnalle. Normaaleilla poraussyvyyksillä ja porakruunun ko'illa putken ulkopintaa pitkin poistuvan maan määrä on marginaalinen. Porauksen päätyttyä poratankoja kierretään vastakkaiseen suuntaan, jolloin porakruunu sulkeutuu ja porauskalusto voidaan nostaa porausputkea pitkin ylös. Tämän jälkeen porausta voidaan jatkaa kallioporauksena. Menetelmää käytettäessä porausputki jää aina kalliohyllylle, mikä on huomioitava paalutusta suunniteltaessa. (RIL 254-1-2011; Viitala 2013) Kuvas-  
sassa 8 on esitetty periaatekuva epäkeskisestä porausmenetelmästä.



Kuva 8 Periaatekuva epäkeskisestä porausmenetelmästä. (Pålkommissionen 2010)

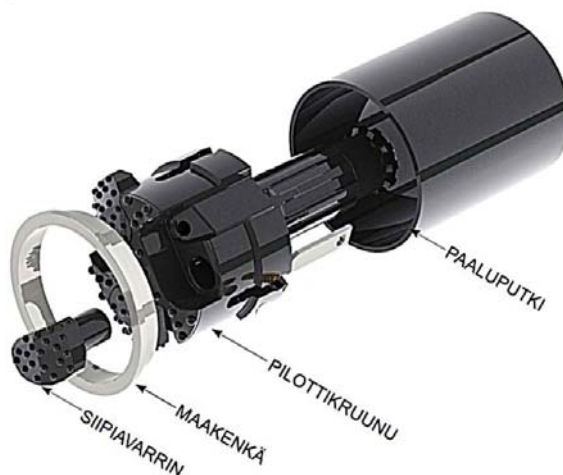
Menetelmän etuna on se, ettei porausreikään jää maakenkää lukuun ottamatta muita porauskaluston osia, mikä laskee porauksen kustannuksia. Menetelmän haasteiksi luetaan taas se, ettei menetelmä sovellu syviin reikiin, se että menetelmä jumiutuu helposti kiviin sekä se että menetelmää käytettäessä on taipumus isoihin porauspoikkeamiin.

Epäkeskisessä menetelmässä käytettävät erilliset siivekkeet eivät ole kestäviä suomalaisessa kovassa kallioperässä ja lohkarissa. Alun perin siipiterät on kehitetty ainoastaan lohkarettomien maakerrosten poraamiseen. Siipiterällä porattaessa on huomioitava, että porauksen jälkeen paaluputken alapää on noin 100 mm kallioreiän pohjan yläpuolella. Tällöin tulee erityisesti varmistua, että paaluputken alapuolinen kallioreikä saadaan puhtaaksi porasoijasta sekä mahdollisista suuremmista kivistä, jotta paalu saadaan tarkastuslyönneillä tukeutumaan hyvin kallioreiän pohjalle (Viitala 2013; Gylling 2014; Uotinen 2015)

### Keskinen porausmenetelmä

Keskisessä porausmenetelmässä porauskaluston muodostavat pilottikruunu, keskinen avarrinkruunu sekä maakenkä. Pilottikruunu pyörii ja lyö joko maakenkää tai avarrinkruunua terämallista riippuen. Maakenkä, joka on hitsattu paaluputkeen kiinni, vetää paalua porauksessa mukanaan. Avarrinkruunu pyörii pilottikruunun mukana ja laajentaa reikää porausputkea suuremmaksi. (Atlas Copco Rotex 2)

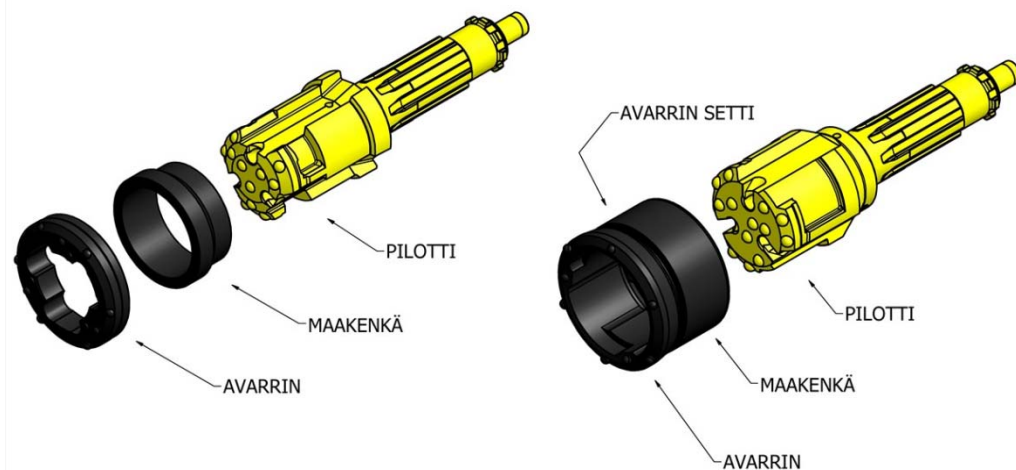
Keskisessä porausmenetelmässä avarrinkruunu on pilottikruunun suhteen symmetrinen. Avarrinkruununa on joko rengasterä (kuva 10) tai siipiterä (kuva 9). Siipiterässä on avattavat siivet, jotka toimivat porattaessa avartimena.



Kuva 9 Keskisessä porausmenetelmässä käytettävä siipiavarrin, maakenkä, pilottikruunu sekä paaluputki. (Borgenström, 2014 / muokattu)

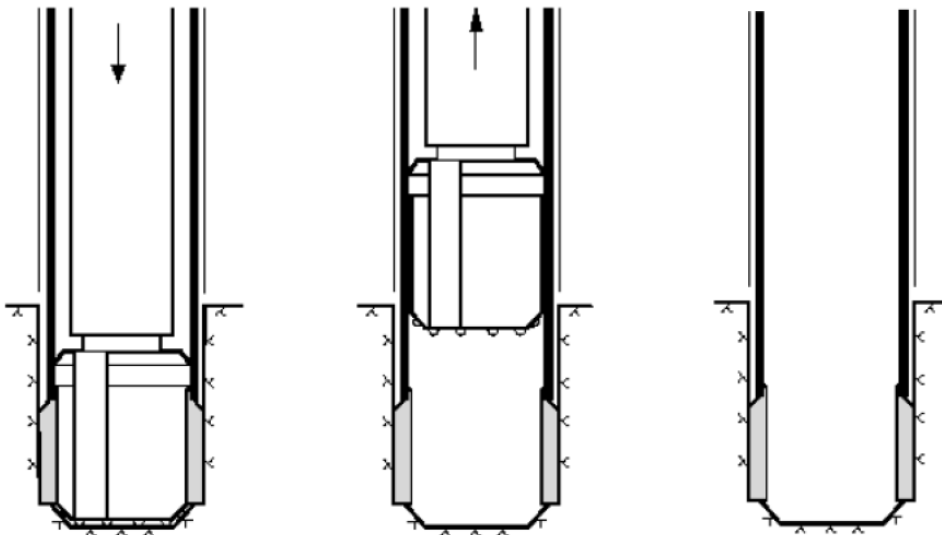
Avarrinkruunut voidaan jakaa avarrinkruunun kallion ja paalun väliin aikaansaaman välyksen leveyden mukaan joko normaalikoon tai ylikoon avartimiksi. Tarkkaa raja-arvoa näiden luokkien välille ei kuitenkaan ole määritelty. Ylikoon avarrinta käytetään, kun on tarve saada aikaan vakiomallia suurempi reikä.

Rengasterä voidaan kiinnittää mekaanisesti maakenkään, jolloin puhutaan rengasteräasettimallista. Rengasteräasettimallissa pilottikruunu lyö rengasavarrinta, joka välittää voimavaikutuksen maakengälle. Vaihtoehtoisesti rengasavarrin voidaan jättää kiinnittämättä maakenkään, jolloin puhutaan irtorengasmallista. Irtorengasmallissa pilottikruunu lyö suoraan maakenkään. (Atlas Copco Rotex 2)



Kuva 10 Keskisessä porausmenetelmässä käytettäviä rengasavartimia. Vasemmalla on irtorengasmalli ja oikealla rengasteräsettimalli. (Atlas Copco Rotex 1)

Keskinen porausmenetelmä (kuva 11) voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Vanhemmassa menetelmässä porausputkea isketään ja pyöritetään. Uudemmassa vain porausputken alapäässä olevaa avarrinkruunua pyöritetään, mutta porausputkea ei pyöritetä. Kun on saavutettu tavoitesyvyys, pilottikruunu irrotetaan avarrinkruunusta ja nostetaan ylös. Avarrinkruunu jää porausreikään. Tämän jälkeen porausta voidaan tarvittaessa jatkaa kallioporausena (RIL 254-1-2011).



Kuva 11 Periaatekuva keskisestä porausmenetelmästä. (Pålkommissionen 2010)

Menetelmän etuina ovat pienemmät porauspoikkeamat sekä nopeampi ja helpompi poraussuoritus. Menetelmä mahdollistaa isojen paalukokojen poraamisen. Rengasterällä porattaessa etuina ovat porauskaluston yksinkertainen ja kestävä rakenne ja haittapuolina porausreikään jäävän porakaluston osien tuomat lisäkustannukset. Siipiterällä porattaessa etuna on, ettei porausreikään jää maakenkää lukuun ottamatta muita porauskaluston osia, ja haittapuolena heikompi kestävyys suomalaisessa kovassa kallioperässä rengasterään verrattuna.

## 2.2 Kallioankkuri

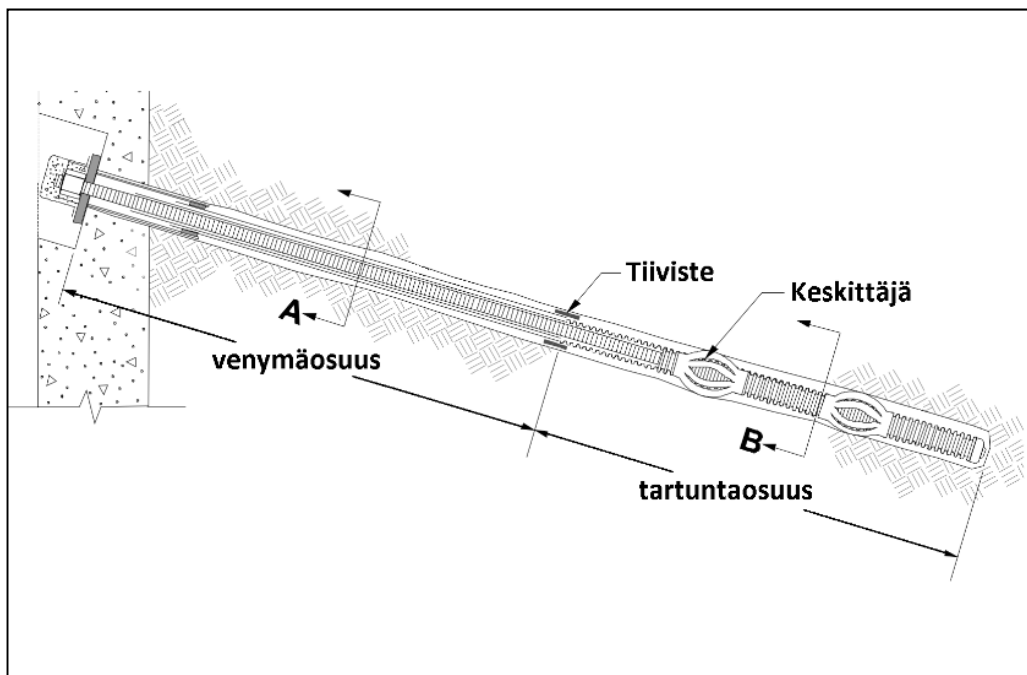
Kallioankkurin tehtävä on välittää yläpuolisesta rakenteesta aiheutuvat vetokuormitukset peruskallioon. Kallioankkuri muodostuu venymäosuudesta ja tartuntaosuudesta. Ankkuri on injektoitu tartuntaosuudeltaan kallioon. Tartuntaosuudella ankkuriin kohdistuvat voimat siirtyvät kallioon. Venymäosuudeksi kutsutaan etäisyyttä tartuntaosuuden päästä ankkurin päähän.

### 2.2.1 Ankkurityypit ja materiaalit

Kallioankkureina käytetään joko punosankkureita, tankoankkureita, putkiankkureita tai pora-ankkureita. Kallioankkureiden materiaalina käytetään korkealujuuksista punosvajeria, terästankoa tai teräspuutetta. Yleisimmät punosvajereissa käytetyt teräslaadut ovat 1570/1770 MPa ja 1640/1860 MPa, terästangoissa 950/1050 MPa sekä 1080/1230 MPa ja teräspuutissa 550/700 MPa. (RIL 263-2014)

Yleisimmin käytetyt tankoankkurit ovat Dywidagin valmistamat GWS, GEWI ja GEWI-Plus sekä SAH:n valmistamat SAS-tankoankkurit. Yleisimmät läpi-injektoitavat ankkurit ovat Mai sekä Ischebeck Titan.

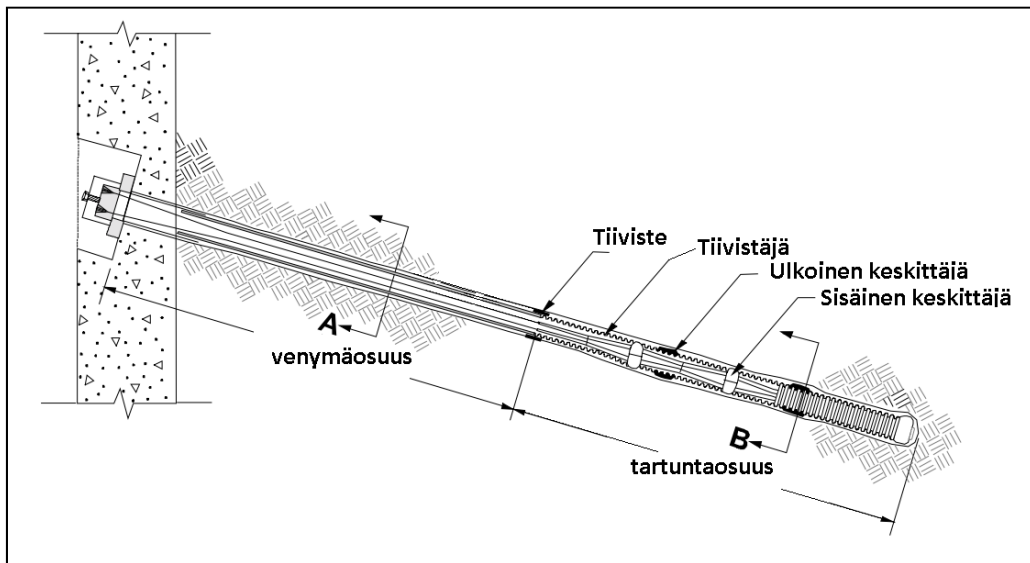
Kuvassa 12 on esitetty tyyppipoikkileikkaus tankoankkurista.



Kuva 12 Tyypileikkaus tankoankkurista. Leikkaukset A ja B on esitetty kohdan 3.3.5 Korroosio yhteydessä.



Kuvassa 13 on esitetty tyyppipoikkileikkaus punosankkurista.



Kuva 13 Tyyppileikkaus punosankkurista. Leikkaukset A ja B on esitetty kohdan 3.3.5 Korroosio yhteydessä.

### 2.2.2 Asentaminen

Kallioon porataan tavanomaisesti 4–8 m pitkä reikä kallioporauskalustolla. Tämän jälkeen kallioreiän vesitiiveys testataan vesimenekkikokeella. Mikäli tiiveysvaatimukset eivät täyty, tehdään tiivistysinjektointi. Kun injektointimassa on kovettunut, reikä porataan auki ja tehdään uusi vesimenekkikoe. Kun kallioreikä täyttää tiiveysvaatimukset, se täytetään injektointiaineella kallioreiän pohjalta alkaen. Tämän jälkeen ankkuri lasketaan kallioreikään. Injektointiaineen kovettumisen jälkeen ankkurit koevedetään suunnittelijan määrittämällä koevetovoimalla. (Leino, 2014; RIL 263-2014)

## 2.3 Injektointi

Tässä luvussa käsitellään porapaalun injektointia ja sitä koskevaa ohjeistusta. Porapaalun injektoinnissa paaluputken ja kallion välinen tyhjätila täytetään injektointiaineella. Injektoinnilla pyritään lisäämään joko paalun vetokestävyyttä tai momenttijäykkyyttä tai näitä molempia. Injektointi voidaan toteuttaa usealla eri menetelmällä ja eri injektointiaineita käyttäen. Injektoinnin valmistelussa sekä varsinaisessa injektoinnissa on huomioitava, että suunnitellut materiaalilujuudet saavutetaan. (Suomen betoniyhdistys 2006)

Porapaalun injektointina voidaan käsittää myös paalun alapuolisen kallion injektointi kallion laadun parantamiseksi joko ennen tai jälkeen porapaalun asentamista. Porapaalun injektoinnilla voidaan tarkoittaa myös paalun sisään asennettavan ankkurin kallioreiän tiivistysinjektointia. Tässä työssä porapaalun injektoinnilla tarkoitetaan kuitenkin vain edellisessä kappaleessa todettua paaluputken ja kallion välisen tyhjätilan täyttämistä injektointiaineella.

### 2.3.1 Injektointimenetelmät

Injektointimenetelmät jaetaan painovoimaiseen, paineelliseen sekä porauksen aikana tapahtuvaan injektointiin.

#### 2.3.1.1 Painovoimainen injektointi

Menetelmässä injektointiaine pumpataan paalun sisään ilman ylipainetta. Painovoimaista injektointia on mahdollista tehostaa lyömällä, täryttämällä tai nostelemalla paaluputkea. (Savolainen 2013)

Toteutusstandardi (SFS-EN 14199) ei ota kantaa painovoimaisen injektoinnin toteutustapaan kallioon asennettavien porapaalujen yhteydessä.

#### 2.3.1.2 Paineellinen injektointi

Toteutusstandardin (SFS-EN 14199) mukaan paalun paineellinen injektointi voidaan toteuttaa 6 eri menetelmällä. Näistä menetelmistä 4 soveltuvat teräspuikiporapaalujen injektointiin:

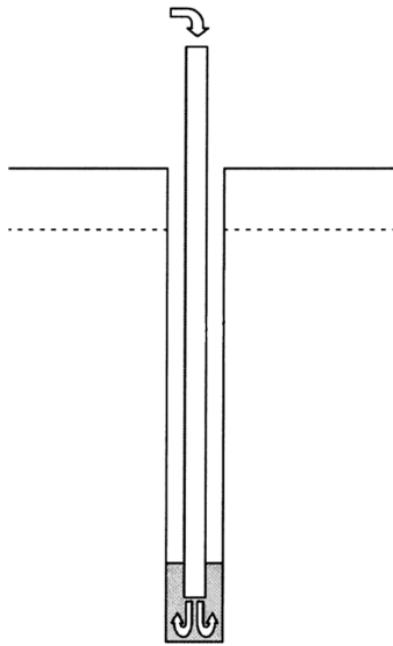
- yksivaiheinen injektointi kuormaa siirtävän elementin läpi
- porrastettu injektointi yksivaiheisena mansettiputkien kautta
- porrastettu injektointi monivaiheisena mansettiputkien kautta
- injektointi jälki-injektointiputkien kautta

Lisäksi paineellinen injektointi voidaan toteuttaa

- injektointina paaluun hitsattujen injektointiputkien kautta
- injektointina injektointirenkaan avulla

#### **Yksivaiheinen injektointi kuormaa siirtävän elementin läpi**

Yksivaiheinen injektointi voidaan tehdä paaluputken pohjalta käsin, kun kuormaa siirtävänä rakenteena käytetään paaluputkea (kuva 14). Injektointi on uusittava tietyn odotusajan kuluttua, mikäli vaadittua injektointipainetta ei saavuteta ensimmäisellä injektointikerralla. (SFS-EN 14199)

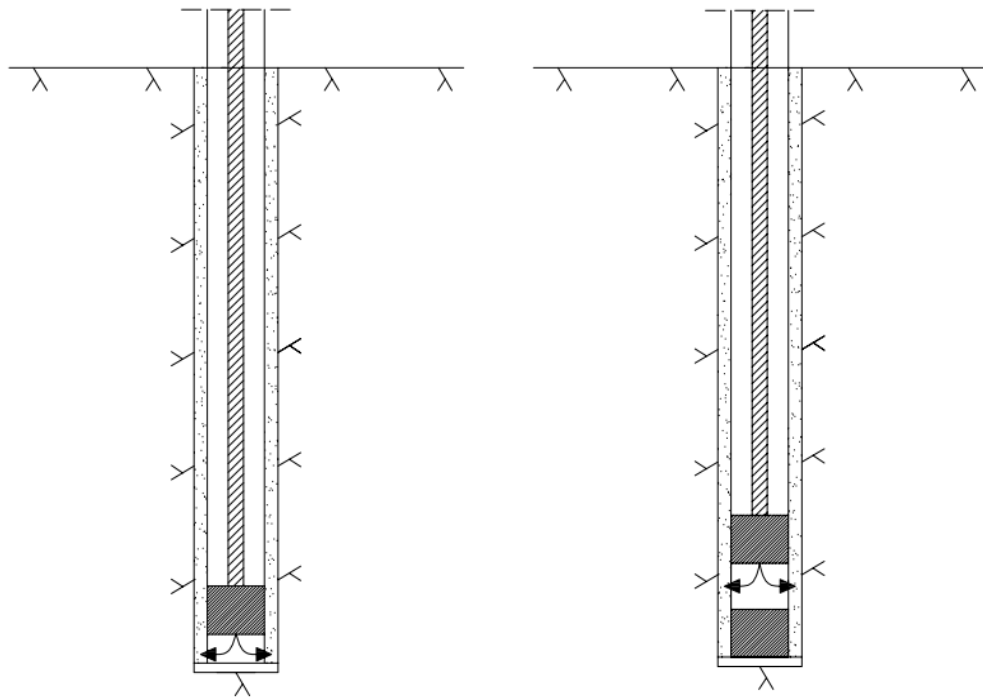


Kuva 14 Yksivaiheinen injektointi kuormaa siirtävän elementin läpi. (SFS-EN 14199)

#### Injektointi mansettiputkien läpi

Porrastettu injektointi voidaan suorittaa yksivaiheisena tai monivaiheisena mansetti-putkien läpi (kuva 15). Injektointi on uusittava tietyn odotusajan kuluttua, mikäli vaadittua injektointipainetta ei saavuteta ensimmäisellä injektointikerralla. Monivaiheisena toteutettu injektointi on varmempi toteutustapa. Useammalta korkeustasolta toteutetulla injektoinnilla saavutetaan todennäköisemmin tasainen injektointiaineen leviäminen.

Injektoinnissa käytetään joko mansettia tai kaksoismansettia. Injektointiaine pumpaataan ensin paalun sisälle laskettuun mansettiin. Mansettia käytettäessä injektointiaine leviää paalun alta sekä mahdollisesti paalun seinämään tehtyjen reikien kautta paalun ja kallion väliseen tilaan. Kaksoismansettia käytettäessä injektointiaine leviää paaluputken seinämään tehtyjen reikien kautta paalun ja kallion väliseen tilaan.



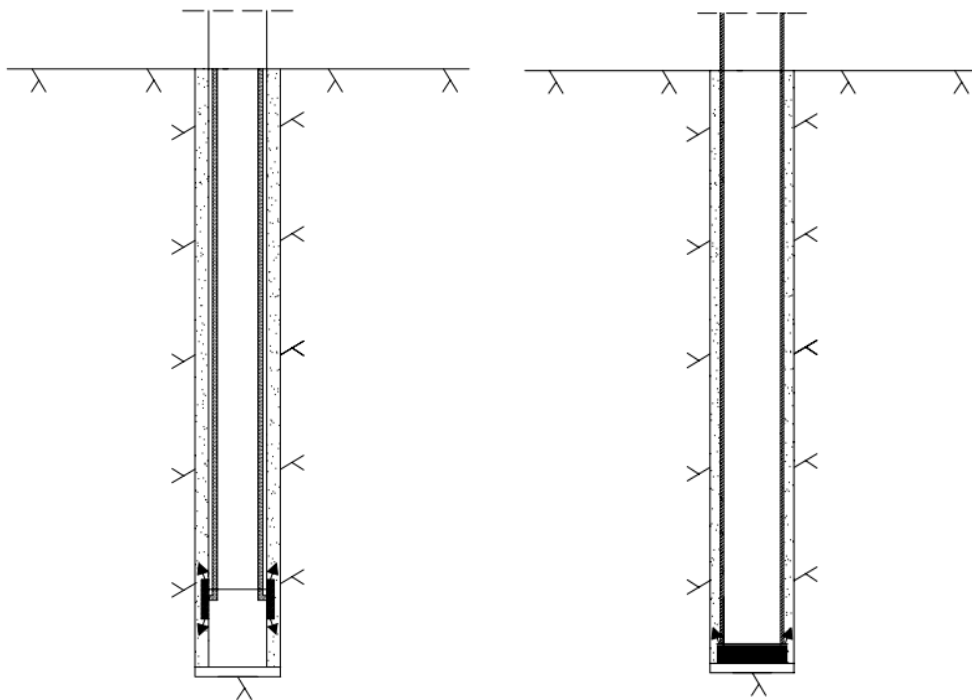
Kuva 15 Yksivaiheinen injektointi mansetilla ja porrastettu injektointi kaksois-mansetilla.

#### **Injektointi paaluun hitsattujen injektointiputkien kautta**

Menetelmässä injektointiaine pumpataan tietyllä injektointipaineella paaluun hitsattujen injektointiputkien ja yksisuuntaventtiilien kautta paalun ja kallion väliseen tilaan (kuva 16). Injektointi voidaan toteuttaa joko yhdeltä tai useammalta tasolta. (Ahonen, 2014)

#### **Injektointi injektointirenkaan kautta**

Menetelmässä injektointiaine pumpataan tietyllä paineella paalun ulkopuolelle hitsattujen injektointiputkien kautta porakruunun yläpuolella olevaan injektointirenkaaseen (kuva 16). Injektointiaine leviää injektointirenkaassa olevien reikien kautta paalun ja kallion väliseen tyhjätilaan. (Miettinen, 2014)



Kuva 16 Vasemmalla injektointi injektointiputkien kautta ja oikealla injektointi injektointirenkaan kautta.

### 2.3.1.3 Injektointi porauksen aikana

Kuormaa siirtävät elementit varustetaan porakruunulla ja porataan maahan. Menetelmässä käytettävä injektointiaineen paine ja määrä tulee säätää riippuen injektointiaineen kyvystä läpäistä maa-ainesta, jonka porausprosessi on löyhdyttänyt. Huuhtelu tulee suorittaa tasaisella nopeudella ja uudelleen joka kerta, kun uusi kuormaa siirtävän elementin osa lisätään ennen porakruunun etenemistä. (SFS-EN 14199)

Menetelmä soveltuu käytettäväksi vain läpi-injektoitavien porapaalujen yhteydessä. Yksityiskohtaisempi tarkastelu sivuutetaan tässä yhteydessä.

### 2.3.2 Injektointiaineet

Injektointiaineet voidaan jakaa sementtipohjaisiin sekä kemiallisiin injektointiaineisiin. Porapaalujen injektoinnissa käytetään pääosin sementtipohjaisia injektointilaasteja. Laastien ominaisuuksia, kuten sitoutumisaikaa ja tunkeutuvuutta, voidaan parantaa erilaisilla lisäaineilla. Erityisesti notkistimien käyttö on yleistä. (Suomen betoniyhdistys 2006; RIL 154-2-1987)

#### Sementti-injektointiaine

Toteutusstandardin (SFS-EN 14199) mukaan vesi-sementtisuhteen tulee soveltua valitsemiin pohjaolosuhteisiin eikä se saa olla suurempi kuin 0,55, ellei toisin mainita. Puristuslujuuden tulee olla vähintään 25 MPa 28 päivän kuluttua testattuna lieriömäisillä koekappaleilla ( $h/d=2$ ) tai jo aiemmin mikäli paalua kuormitetaan aikaisemmin. Sallittu vedenerottuminen on alle 3 % 2 tunnin kuluttua.

Injektointiaineen laatua ja koostumusta tulee valvoa tarkkailukokeilla, joissa seurataan injektoitavan aineen ominaisuuksia verrattuna vaadittuihin ominaisuuksiin. Juotoslaasteilla on testattava vähintään tiheys ja työstettävyys.

Sementtipohjaisten sideaineiden etuja ovat suuri puristuslujuus, muovautuvuus, pitkäikäisyys, ympäristöystävällisyys sekä kustannustehokkuus. Heikkouksiin kuuluvat huono vetolujuus, pitkä ja herkkä lujittumisprosessi sekä monimutkainen laadunvalvonta. (Savolainen 2013; Suomen betoniyhdistys 2006; RIL 154-2-1987) Sementtipohjaisten injektointiaineiden heikkouksiin kuuluu myös huuhtoutumisriski. (Mansikkamäki 2014)

Injektointiin käytettävät sementit voidaan jakaa raekokojakauman mukaisiin luokkiin taulukon 1 mukaisesti. (Kalliotilojen injektointi 2006)

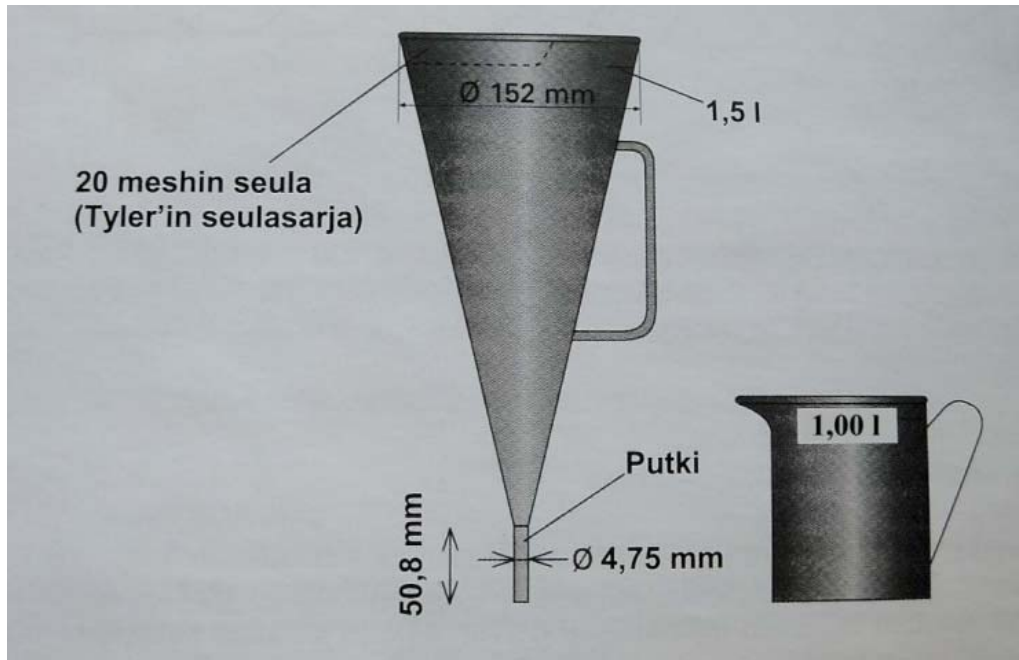
*Taulukko 1 Sementtien jako luokkiin raekokojakauman perusteella. (Kalliotilojen injektointi 2006)*

	Läpäisyprosentti 95, $d_{95}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Läpäisyprosentti 95, $d_{95}$ [mm]
Yleissementit	< 128	0,128
Nopeasti kovettuvat sementit	< 64	0,064
Injektointisementit	< 30	0,03
Mikrosementit	< 20	0,02
Ultrahienot sementit	< 16	0,016

### **Laadunvalvonta**

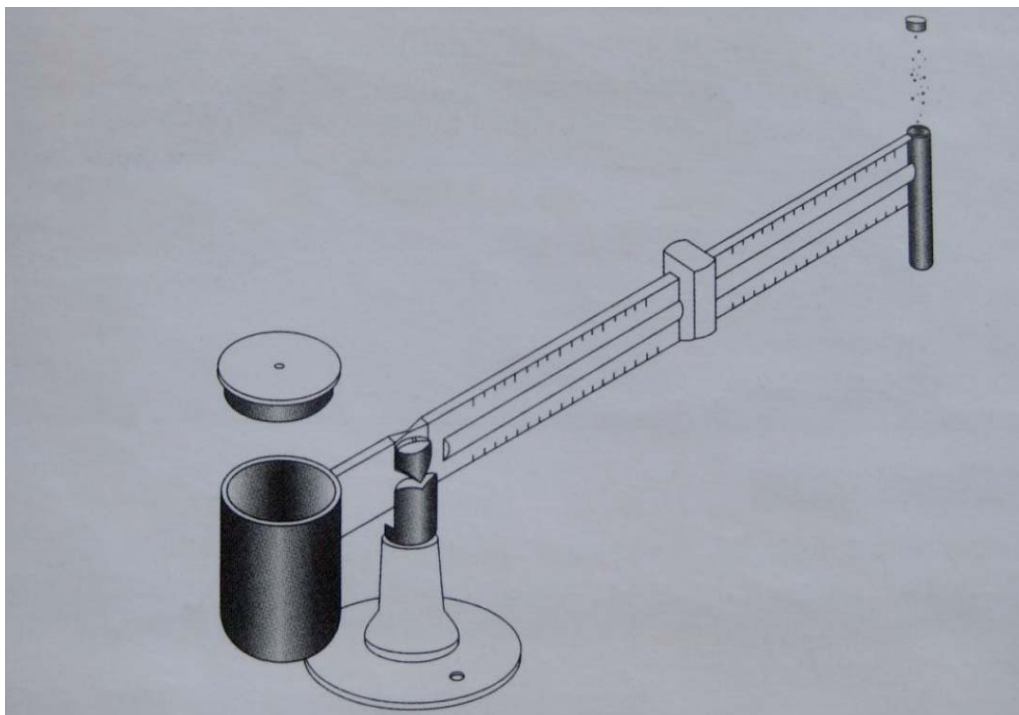
Sementtipohjaisten injektointimassojen laatu tulee varmistaa laadunvalvontakokein. Massan tiheys eli veden ja sementin suhde varmistetaan Mud Balance -laitteella ja viskositeetti March-suppilokokeella. Näiden lisäksi mitataan vedenerottuminen. (Kalliotilojen injektointi 2006)

March-kokeessa suppiloon kaadetaan 1500 ml  $\pm 15\text{ml}$  injektointimassaa (kuva 17). Kaadon jälkeen mitataan aika, kunnes suppilon läpi on mennyt 1000 ml  $\pm 10\text{ml}$ . Kokeen tuloksena saadaan March-viskositeetti, joka ei kuitenkaan ole suoraan viskositeetin arvo. March-viskositeetin arvoon vaikuttavat viskositeetin ohella vesi-sementti-suhde sekä myötöraja. (Parkkonen 2012)



Kuva 17 March-koe injektointimassan viskositeetin määrittämiseen.

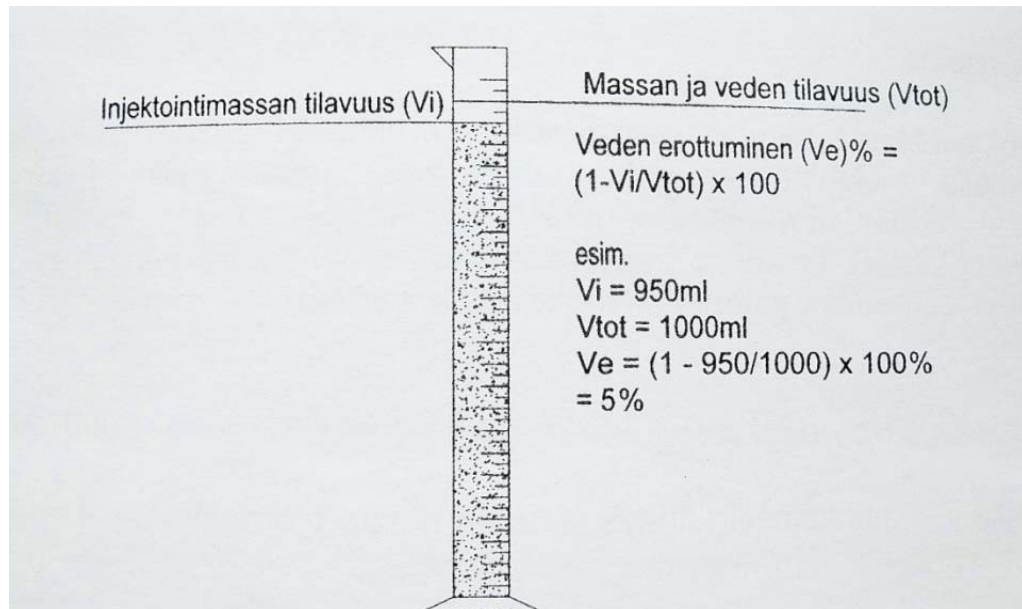
Mud balance -mittalaitteella määritetään injektointimassan tiheys (kuva 18). Kokeessa laitteen mittakuppi täytetään välisekoittimesta otettavalla injektointimassalla. Mittakuppi suljetaan kannella, jotta ylimääräinen massa pursuaa pois. Tiheys luetaan tasapainotilassa mittarin kyljessä olevasta asteikosta. Mittari säädetään tasapainotilaan siirrettävää painoa liikuttamalla. (Parkkonen 2012)



Kuva 18 Mud balance -mittalaite injektointimassan tiheyden määrittämiseen.



Vedenerottumista määritettäessä injektointimassaa kaadetaan 1 litran mittalasiin (kuva 19). Mittalasia ei saa täristää, jotta tulos on luotettava. Mittaustulos tehdään 2 tunnin kuluttua näytteen laittamisesta mittalasiin. Mittalasisista mitataan injektointiaineen korkeus sekä sen pinnalle erottuneen veden paksuus. Kun käytetään 1000 ml mittalasia 10 ml asteikolla, saadaan veden erottuminen mitattua suoraan asteikolta. Tuloksena saadaan yksi prosentti (%) / 10ml. (Parkkonen 2012)



Kuva 19 Injektointimassan vedenerottuminen määritetään mittalasin avulla.

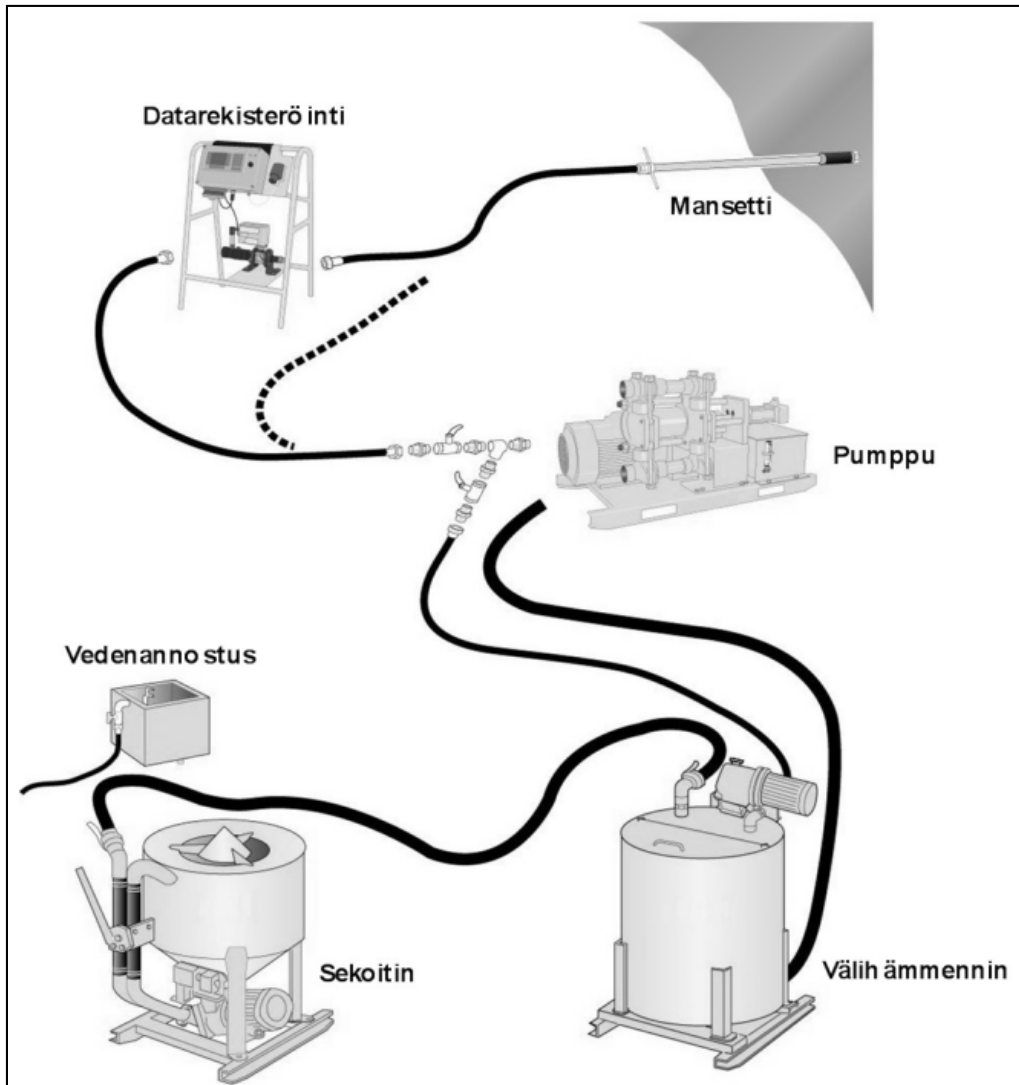
Mikäli veden erottuminen  $V_e$  määritetään laskemalla, tulos saadaan kaavasta 1:

$$(V_e)\% = \left(1 - \frac{V_i}{V_{tot}}\right) \times 100 \quad (1)$$

missä  $V_i$  on injektointimassan tilavuus ja  $V_{tot}$  massan ja veden tilavuus.

### 2.3.3 Injektointikalusto

Injektointikalusto koostuu sekoittajan vedenannostusjärjestelmästä, sekoittimesta, välilihämentimestä, pumpusta ja letkuista (kuva 20). Lisäksi tarvitaan virtauksen ja paineen mittaukseen mittalaitteet. (Suomen betoniyhdistys 2006)



Kuva 20 Injektointikalusto. (Suomen betoniyhdistys 2006)

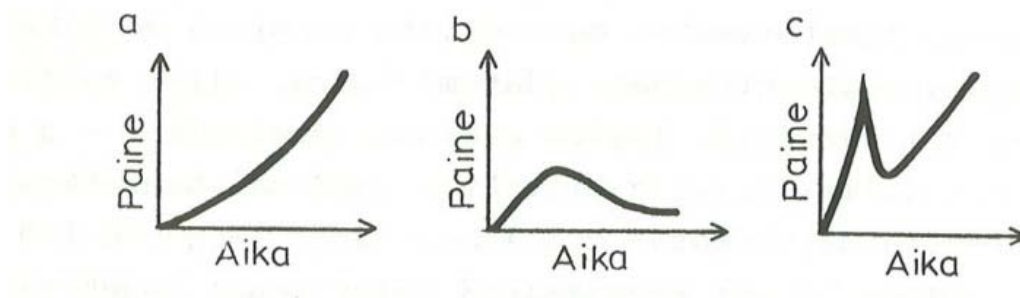
#### Vaatimukset

- Injektoinnissa tulee käyttää injektointiin tarkoitettuja kolloidityyppisiä sekoittimia
- Sekoitussopeuden tulee olla vähintään 1500 rpm
- Injektoinnissa käytettävän pumpun tulee pystyä tuottamaan 10 MPa paine
- Paineen ja virtausnopeuden tulee olla säädettävissä
- Injektointiletken tulee kestää suurin sallittu injektointipaine

#### 2.3.4 Injektointipaine

Injektointiaine tunkeutuu kalliassa oleviin rakoihin sitä paremmin, mitä suurempaa injektointipainetta käytetään. Kallion rikkoutumisvaara asettaa kuitenkin rajan kulloinkin sallittavalle paineelle. (Holopainen 1977)

Injektoinnin onnistuminen tai epäonnistuminen voidaan todeta seuraamalla injektointipaineen kehittymistä injektoinnin aikana. Onnistuneessa injektoinnissa paine nousee jatkuvasti, kunnes saavutetaan kyllästymispaine (kuva 21a). Epäonnistuneessa injektoinnissa paine nousee aluksi, mutta laskee sen jälkeen (kuva 21b). (Holopainen 1977)



Kuva 21 Vasemmalla kuvaaja onnistuneesta injektoinnista ja keskellä epäonnistuneesta injektoinnista. Oikeanpuoleista kuvaajaa voidaan pitää onnistuneena, vaikka injektointipaine hetkellisesti laskeekin. (Holopainen 1977)

Injektointipaine tulee mitata mahdollisimman läheltä injektointikohtaa. Mikäli injektointipaine laskee äkillisesti, on paineellinen injektointi lopetettava. (SFS-14199) Hetkellinen paineen lasku voi olla merkki injektointipaineen aiheuttamasta kallion vaurioitumisesta (Suomen betoniyhdistys 2006). Taulukossa 2 on esitetty suositeltu injektointipaine injektointisyvyyden ja kallion laadun mukaan.

Taulukko 2 Injektointipaineen ohjearvoja (Holopainen 1977).

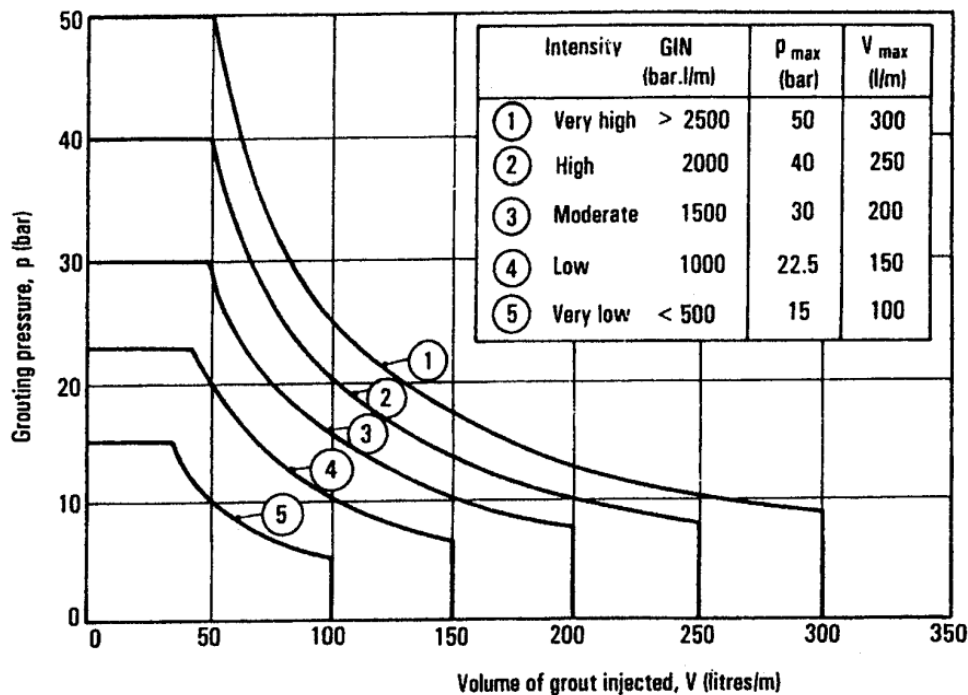
Injektointisyvyys (m)	Injektointipaine, kN/m <sup>2</sup>		
	Heikkolaatuinen kallio	Hyvälaatuinen kallio	Usein käytetty nyrkkisääntö
0–3	100–200	500–1000	100–300
3–6	200–400	1000–1500	300–600
6–10	400–700	1500–2500	600–1000
> 10	>700	>2500	> 1000

Kuvassa 21 ja taulukossa 2 esitetyt vaatimukset koskevat erityisesti kallion tiivistysinjektointia sekä jännepunosankkureiden kallioreikien injektointia. Teräsputki-porapaalujen injektointiin vaatimuksia ei sellaisenaan voida hyödyntää, sillä teräsputki-porapaalujen injektoinnissa ei saada vastaavaa vastapainetta aikaan.

#### GIN-metodi (Grouting of rock masses)

Gin-metodin mukaan injektointipainetta valittaessa tulee huomioida injektointiaineen arvioitu kulutus. (Grouting of rock masses)

Kuvassa 22 esitetään GIN-metodin mukainen injektointipaineen ja injektointiaineen menekin välinen suhde. GIN-metodin mukaan mitä pienempi on injektointiaineen kulutus pituusyksikköä kohden, sitä suurempi injektointipaine tarvitaan.



Kuva 22 Kuvassa on esitetty injektointipaineen ja injektointiaineen menekin välinen suhde.

Teräsputki-porapaalujen injektoinnissa injektointiaineen määrä pituusmetriä kohden vaihtelee muutamasta litrasta sataan litraan. Näin ollen kuvan 22 mukaan injektointipaineeksi saadaan 5–15 bar eli 0,5–1,5 MPa.

Käytännössä porapaalujen injektoinnissa käytetään injektointipaineena 0,5–1 MPa ylipainetta. Injektointipaineen ohella injektointiaineen määrän menekkiä tulee seurata. Suuri injektointiaineen kulutus indikoi usein kallion rikkonaisuudesta. (Mansikkamäki, Perälä, Uotinen 2014)

### 2.3.5 Injektoinnin lopetuskriteeri

Injektoinnin lopetuskriteerin määrittää suunnittelija. Yleinen lopetuskriteeri on lopettaa reiän injektointi, kun injektointimassan virtaus on ollut alle 1...3 l/min 5 minuutin ajan paineella, joka on 80...100 % suurimmasta sallitusta paineesta. Mikäli lopetuskriteeri ei täyty ja injektoitu massamäärä ylittää suunnittelijan määrittämän raja-arvon, vaihdetaan massa jäykemmäksi suunnittelijan ohjeiden mukaisesti. (Suomen betoniyhdistys 2006)

### 3 Nykyiset porapaalujen injektointiin ja ankkurointiin liittyvät suunnittelu- ja toteutusohjeet

#### 3.1 Suunnittelun lähtötiedot

##### 3.1.1 Pohjatutkimukset

Kallionpinnan korkeusasema sekä kallion ehjyys määritetään koekuoppien tai porakonekairauksen perusteella. Kallion ehjyys voidaan määrittää kallionäytetutkimuksilla ja vesimenekkikokeilla.

##### **Porakonekairaukset**

Porapaalutuskohhteessa kallionpinnan sijainti on aina selvitettävä porakonekairauksin ennen paalutustyön aloittamista. Porakonekairauksilla saadaan tietoa kallion rikkonaisuudesta sekä selvitetään kalliopinnan korkeustaso. Kalliossa olevat lustot havaitaan useimmiten porakonekairauksilla, ja ne voidaan huomioida määritettäessä paalun poraussyvyyttä kallioon.

Porakonekairaukset tulee ulottaa vähintään 3 m kallioon sekä vähintään 2 m paalun kärjen alapuolelle. Kun silta perustetaan suurporapaalujen ( $d > 300$  mm) varaan, on porakonekairaus tehtävä jokaisen paalun kohdalta. Kun silta rakennetaan liikennöitävän radan kohdalle, on porakonekairaus tehtävä jokaisen paalun kohdalta. (RIL 230-2007)

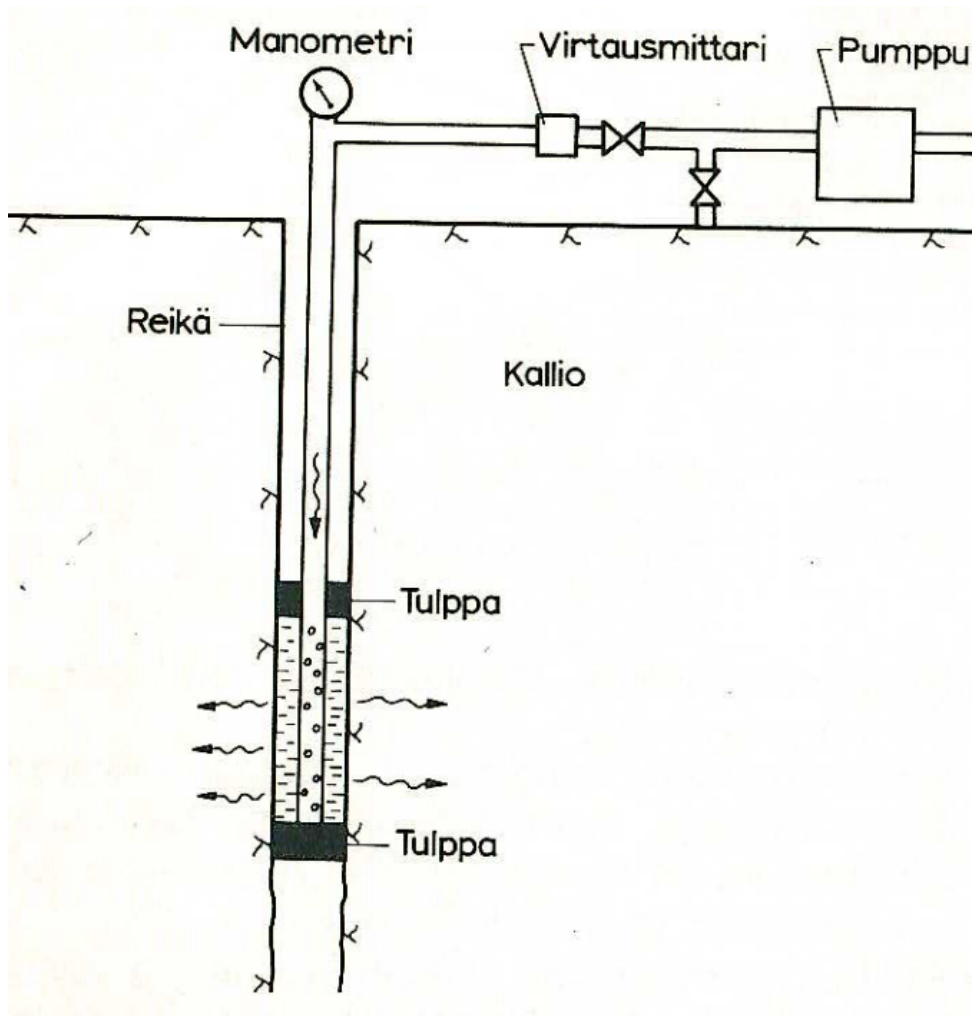
##### **Paalun poraus**

Kallion laatua voidaan arvioida paalua porattaessa porauslietteen värin, porauksen tunkeutumisnopeuden sekä huuhteluvärin ylösvirtauksen perusteella (SSAB 2015). Suuri tunkeutumisnopeus indikoi rikkonaisuudesta kallioista. Porauslietteen värin perusteella saadaan tietoa kivilajista.

##### **Vesimenekkikoe**

Vesimenekkikokeella eli vesipainekokeella mitataan kairausreiässä kalliomassan raakoilua ja vesitiiviyyttä. Vesimenekkikokeessa määritetään kallion vedenjohtavuutta mittaamalla siihen pumpatun veden määrä. Vesimenekkikokeella mitataan kallioreikään tunnetulla paineella suotautunutta vesimäärää määrättyssä ajassa. Ennen kokeen aloittamista mitataan pohjavedenpinnan korkeus kairareikässä. Pinnankorkeuden avulla voidaan laskea pohjaveden paine eri mittauskorkeuksilla. Vesimenekkikoe suoritetaan pumpaamalla kallioreikiin vettä esim. 0,5 MPa ylipaineella kolmessa 5 minuutin jaksossa. Kokeen tulosten perusteella määritetään ns. Lugeon arvo. (Suomen betoniyhdistys 2006; Liikenneviraston ohjeita 13/2011; RIL 98)

Kuvassa 23 on esitetty vesipainekokeen suorituskaavio.



Kuva 23 Vesipainekokeen suorituskaavio. (RIL 98)

$$Lug = \frac{\text{Vesimäärä}}{\text{Ylipaine} \times \text{Mittausaika} \times \text{Mittausväli}} = \frac{[l]}{[\text{MPa}] \times [\text{min}] \times [\text{m}]} \quad (2)$$

Eli yksi Lugeon on litra minuutissa reikämetriä ja megapascalin ylipainetta kohden.

Kalliota voidaan pitää ehjänä, mikäli vesimenekki on alle 1 l/min/m/MPa. Kokeessa käytettävä koepaine on 0,1 MPa ylipaine suhteessa pohjavedenpaineeseen. Vaatimuksena käytetään yleensä 1 lugeonia. Tietyissä kohteissa edellytetään pienempää lug-arvoa.

Vesimenekkikoetta tehtäessä tulee noudattaa menetelmää käsittelevää standardia (SFS-EN ISO 22282-3: 2012).

### Pohjavesihavainnot

Pohjavedenpinnan taso on syytä selvittää suunnitteluvaiheessa. Pohjavedenpinta saadaan selville pohjaveden havaintoputkien avulla. Kallioon injektoitavia porapaaluja käytettäessä tieto pohjavedenpinnan tasosta ohjaa injektointiaineen valinnassa. Mikäli pohjavesi on pohjatutkimustulosten perusteella syvällä, voidaan injektoinnin onnistumiseen lähtökohtaisesti luottaa varmemmin, sillä sementtipohjaisia injektointiaineita käytettäessä huuhtoutumisriski laskee tällöin oleellisesti.

### 3.1.2 Vaativuusluokitus

#### Geotekninen luokka

Suunnittelukohteiden luokitteluun käytetään kolmea eri geoteknistä luokkaa. Luokkaan 1 kuuluvat rakenteet, joissa perusvaatimusten täyttyminen voidaan varmistaa kokemuksen ja kvalitatiivisten geoteknisten tutkimusten avulla sekä rakenteet, joista ei aiheudu merkittävää riskiä. Geotekniseen luokkaan 2 kuuluvat rakenteet, joissa vaaditaan kvantitatiivisia geoteknisiä lähtötietoja ja analyysejä varmistamaan suunnittelun perusvaatimusten täyttyminen sekä rakenteet, joihin ei liity tavanomaisesta poikkeavia riskejä tai epätavallisia tai erityisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita. Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat rakenteet sekä rakenteiden osat, jotka eivät kuulu geoteknisiin luokkiin 1 ja 2. Näitä ovat mm. erittäin suuret tai epätavalliset rakenteet sekä rakenteet, joihin liittyy normaalista poikkeavia riskejä. (RIL 254-1-2011)

#### Paalutustyöluokka

Paalutustyöluokka on paalutuksen toteutuksen huomioiva luokitus. Se määräytyy geoteknisen luokan sekä seuraamusluokan perusteella taulukon 3 mukaisesti. (RIL 254-1-2011)

#### Seuraamusluokka

Seuraamusluokkia on kolme, CC1, CC2 ja CC3. Luokituksessa CC3-luokka kuvaa suuria seuraamuksia ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. CC2-luokka kuvaa keskisuuria seuraamuksia ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. CC1-luokka kuvaa vähäisiä seuraamuksia ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. (Pentti 2010)

Taulukko 3 Paalutustyöluokan määräytyminen (RIL 254-1-2011).

Geotekninen luokka	Seuraamusluokka		
	CC1	CC2	CC3
GL1	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)
GL2	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3
GL3	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3

## 3.2 Porapaalu

### 3.2.1 Poraussyvyys kallioon

Paalutusohjeen (2011) mukaan paalu on porattava ehjään kallioon vähintään 3 x paalun ulkohalkaisija, kuitenkin vähintään 0,5 m. Halkaisijaltaan yli 300 mm olevilla paaluilla turvallinen upotussyvyys kallioon suunnitellaan tapauskohtaisesti. Yli 1,5 m:n syvyydelle kallioon poraaminen ei yleensä ole tarkoituksenmukaista Suomen kallio-perässä. Rikkonaisessa kalliossa paalut on porattava syvemmälle tai injektoitava vaipalta. Mikäli kallion pinta on huomattavan jyrkkä, on syytä tehdä lisäkairauksia paalujen ympäriltä. (RIL 254-1-2011)

Liikenneviraston ohjeistuksen mukaan paalu on porattava ehjään kallioon vähintään 3 x paalun ulkohalkaisija, kuitenkin vähintään 0,5 m. (Liikenneviraston ohjeita 12/2011)

Eurokoodi ei ota kantaa porausyvytyteen. (SFS-EN 1997-1)

### 3.2.2 Paalun vetokestävyys

Paalun vetokestävyys määräytyy yleensä paalun geoteknisen vetokestävyuden mukaan. Vain ankkuroiduissa paaluissa rakenteellinen kestävyys saattaa tulla mitoittavaksi. Paalun geotekninen vetokestävyys kalliossa määritetään paalun painon ja kallioon injektoidun vaipan vaippavastuksen summana. (TIEH2000002-001)

#### Kallioon tukeutuvan porapaalun vaippavastus

Kun porapaaluihin kohdistuu vetojännityksiä, on tarpeellista hyödyntää mitoituksessa paalun vaippavastusta. Tällöin porausputki porataan kallion pintaan, ja porausta jatketaan kallioporauksena. Mikäli paalun vaipan injektointi on mahdollista paalun porauksen yhteydessä, erillistä kallioporausta ei tarvita. (RIL 254-1-2011)

Kallioon injektoidun vaipan vaippavastuksen suuruus riippuu porareian halkaisijasta, tartuntapituudesta kalliossa sekä kallion ja injektointiaineen välisestä ominaistartuntalujuudesta (Paalutusohje 2011). Paalun paino on teräsputken massan sekä paalun sisäpuolisen betonin massan summa. Teräsputken massa saadaan paaluvalmistajan tuoteluettelosta.

Injektoidun porapaalun vaipan geotekninen kestävyys  $R_{ck}$  saadaan kaavasta 3:

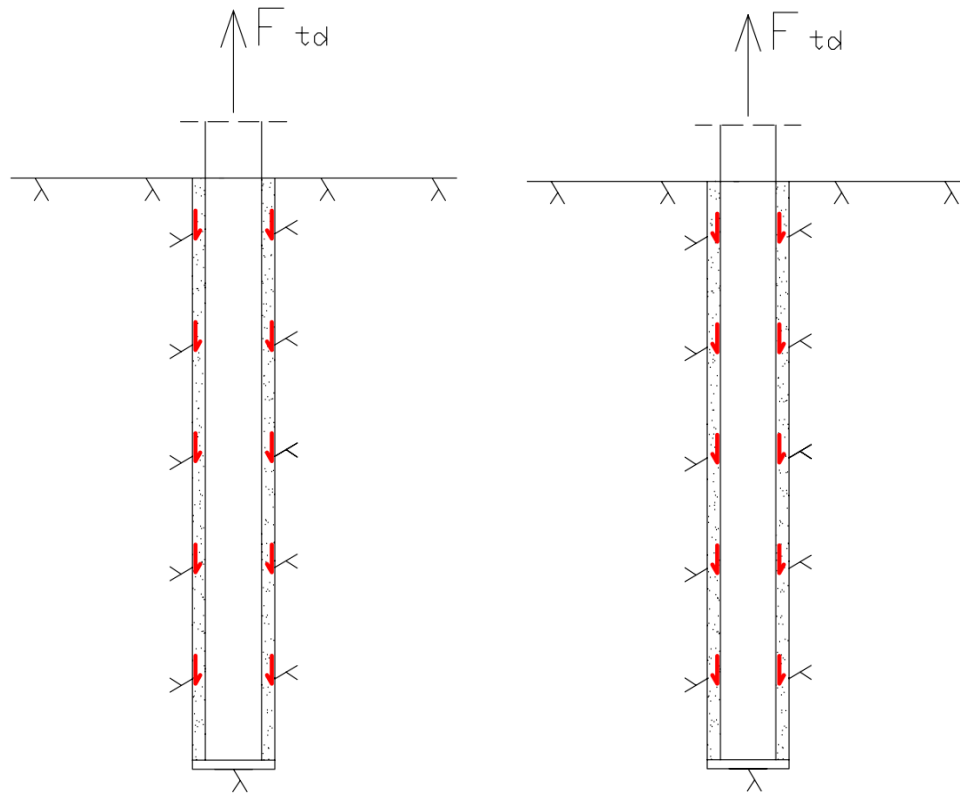
$$R_{ck} = \pi \times d \times D \times \tau_{s;k} \quad (3)$$

missä	$d$	on porareian halkaisija
	$D$	tartuntapituus kalliossa
	$\tau_{s;k}$	betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen ja kallion välinen ominaistartuntalujuus

Kaavassa 3 on oletettu betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen ja kallion välinen tartuntajännitys tasaisesti jakautuneeksi porareian pituudelle.

Kuvassa 24 on esitetty kallioon injektoidun porapaalun vaipan geoteknisen kestävyysden murtomekanismit.





Kuva 24 Vasemmalla kallio-laasti-tartunta sekä oikealla paaluputken ja laastin välinen teräs-laasti-tartunta.

#### Injektointiaineen ja kallion välinen tartuntalujuus

Tartuntalujuus voidaan arvioida tavanomaisilla kallioilla injektointiaineen lujuusluokan perusteella alla olevan taulukon (4) mukaan.

Taulukko 4 Betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen ja kallion välinen ominaistartuntalujuus tavanomaisilla kallioilla. (RIL 254-1-2011)

Betonin/laastin/injektointiaineen lujuusluokka	Ominaistartuntalujuus $\tau_{s;k}$ [MPa]
C20/25	0,5 – 1,0
C25/30	0,55 – 1,1
C30/37	0,6 – 1,2
C35/45	0,65 – 1,3
C40/50	0,7 – 1,4
C45/55	0,75 – 1,5

#### Injektointiaineen ja teräksen välinen tartuntalujuus

Lisäksi on tarkistettava betonin tai juotoslaastin ja ankkurointiteräksen välinen tartunta kaavalla 4:

$$R_{ct} = \pi \times d \times D \times \tau_{s;k} \quad (4)$$

missä  $d$  on paalun halkaisija  
 $D$  tartuntapituus kalliossa  
 $\tau_{s;k}$  betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen ja teräksen välinen ominaistartuntalujuus

Tartuntalujuuden ominaisarvo lasketaan kaavalla 5 (RIL 254-1-2011):

$$\tau_{s,k} = k_b \times f_{ctk} \quad (5)$$

missä  $k_b$  on paalun pinnan muodosta johtuva tartuntakerroin  
 ○ sileä pinta  $k_b = 0,7$   
 ○ kierteytetty pinta  $k_b = 2,0$   
 $f_{ctk}$  betonin/laastin vetolujuuden ominaisarvo, taulukko 5

*Taulukko 5 Betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen vetolujuuden ominaisarvo (RIL 254-1-2011).*

Betonin/laastin/injektointiaineen lujuusluokka	Betonin/laastin/injektointiaineen vetolujuuden ominaisarvo $f_{ctk}$
C20/25	1,5
C25/30	1,8
C30/37	2,0
C35/45	2,2
C40/50	2,5
C45/55	2,7

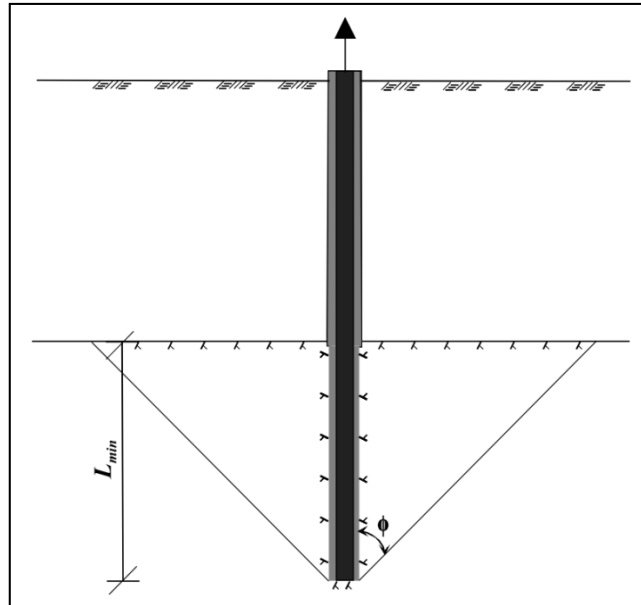
#### Kalliokartion paino

Lisäksi on tarkistettava, että paalun ympärille muodostuvan kalliokartion paino on riittävä vastaanottamaan paalulle kohdistuvan vetokuorman (kuva 25). (RIL 254-1-2011)

Vaadittu ankkurointipituus  $L_{min}$  saadaan kaavasta 6:

$$L_{min} = \sqrt[3]{\frac{3 \times F_{t,d}}{(\gamma_d - 10) \times \pi \times \tan^2 \varphi}} \quad (6)$$

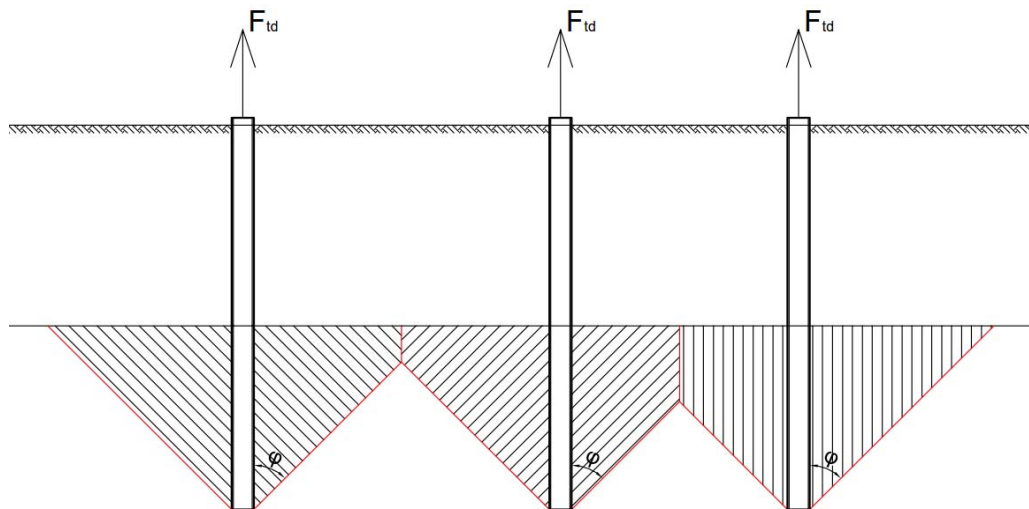
missä  $F_{t,d}$  on vetokuorman mitoitusarvo  
 $\gamma_d$  kallion tilavuuspaino  
 $\varphi$  45° homogeenisessa kalliossa,  
 30° rikkonaisessa kalliossa



Kuva 25 Paalun vähimmäisankkurointipituus kalliossa (RIL 254-1-2011).

Jos kallion rakoiluominaisuuksia ei ole luotettavasti määritetty, valitaan tartuntaosan pituudeksi aina vähintään 3 m.

Määritettäessä kallioon ankkuroitujen vetopaalujen etäisyyksiä toisistaan on määritettävä minimiankkurointipituus  $L_{min}$  niin, että paalun tai paaluryhmän ympärille muodostuvan kalliokartion tehokas paino on riittävä ottamaan vastaan paalujen veto-kuormituksen (vrt. kuva 26). (RIL 254-1-2011)



Kuva 26 Kuvassa on esitetty kunkin paalun kalliokartion tehokas paino.

Mikäli edellä mainituin menetelmin ei saavuteta riittävää vetokestävyyttä, on paalu ankkuroitava kallioon erillisellä ankkurilla. Käytettäessä erillistä ankkurointia tulee paaluun kohdistuvat vetojännitykset ottaa vastaan kokonaan ankkureilla. Mikäli paaluun kohdistuu pysyvä vetorasitus, paalut toimivat ankkureina, ja ne tulee suunnitella ankkuroinnista annetun ohjeistuksen mukaisesti. Ankkureita koskeva ohjeistus on käsitelty luvussa 3.3. (RIL 254-1-2011)

Määritettäessä paalun rakenteellista vetokestävyyttä tulee paalun jatkokset huomioida. Mekaanisten jatkosten vetokestävyys on porapaaluilla vähintään 15 % puristuskestävyydestä. SSAB:n kierreholkkijatkoksilla vetokestävyys on kuitenkin vähintään 50 % puristuskestävyydestä. Mekaanisten jatkosten käyttö rajoittaa siis paalun vetokestävyyttä. (SSAB:n teräspaalut; Suunnittelu- ja asennusohjeet)

#### **Ruotsalainen ohjeistus**

Trafikverketin ohjeen 'TK Geo 11' mukaan kalliokartion painoa määritettäessä myös kallion päällä olevien maakerrosten paino voidaan huomioida. Maakerrosten paino toimii vakauttavana kuormana, joten se tulee huomioida 0,9-kertaisena.

#### **Paalujen vetokestävyyden mitoitusarvo**

Vetokestävyyden ominaisarvo  $R_{sk}$  saadaan kaavasta 7:

$$R_{sk} = \frac{R_c}{m} \quad (7)$$

missä	$R_c$	on geoteknisen vetokestävyyden laskennallinen arvo
	$m$	mallikerroin

Vetokestävyyden mitoitusarvo  $R_{td}$  saadaan kaavasta 8:

$$R_{td} = \frac{R_{sk}}{\gamma_{st}} \quad (8)$$

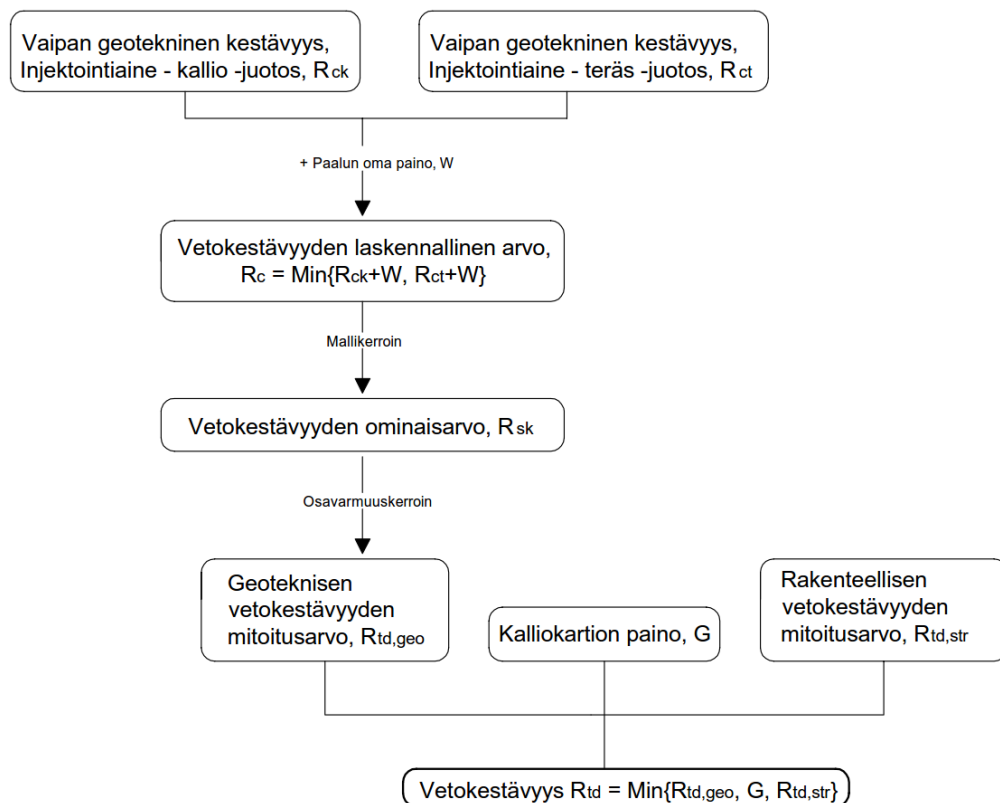
missä	$R_{sk}$	on geoteknisen vetokestävyyden ominaisarvo
	$\gamma_{st}$	vetokestävyyden osavarmuusluku

Vetorasitettujen paalujen osavarmuuslukuina  $\gamma_{st}$  käytetään

- lyhytaikainen kuormitus 1,35
- pitkäaikainen kuormitus 1,50

Osavarmuuslukua  $\gamma_{st}$  korjaavan mallikertoimen arvona sekä lyhytaikaisessa että pitkäaikaisessa kuormituksessa käytetään vähintään 1,50.

Ankkuroidun porapaalun vetokestävyyden mitoituksen eteneminen on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27 Ankkuroidun porapaalun vetokestävyys mitoitus

### Koeveto

Vetopaalulle voidaan tehdä koeveto, jolloin paalulle sallittavan vetokuorman suuruus määritetään koekuormitustulosten perusteella. (RIL 254-1-2011)

Tällöin paalun vetokestävyys ominaisarvo määritetään kaavasta 9:

$$R_{t;k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{t;m})_{\text{mean}}}{\xi_1}; \frac{(R_{t;m})_{\text{min}}}{\xi_2} \right\} \quad (9)$$

missä  $\xi_1$  ja  $\xi_2$  ovat korrelaatiokertoimia, jotka riippuvat koekuormitettujen paalujen lukumäärästä ( $n$ ) ja jotka kohdistetaan vastaavassa järjestyksessä, mitatun vetokestävyys keskiarvoon  $(R_{t;m})_{\text{mean}}$  ja minimiarvoon  $(R_{t;m})_{\text{min}}$ .

Taulukko 6 Korrelaatiokertoimet vetokuormituksille staattisten koekuormitusten perusteella.

$\xi$ kun $n =$	1	2	3/50 %	4	5/100%
$\xi_1$	1,75	1,63	1,5	1,38	1,25
$\xi_2$	1,75	1,5	1,31	1,25	1,25

### 3.2.3 Korroosio

Korroosio tulee huomioida suojaamattomien teräsputkipaalujen mitoituksessa korroosiovarana. Korroosiovaran suuruus riippuu paalua ympäröivistä olosuhteista (taulukko 7). Olosuhteet jaetaan tavanomaisiin ja tavanomaisista poikkeaviin. Tavanomaisissa olosuhteissa häiriintymättömillä luonnonmailla korroosioksi otaksutaan 1,2 mm sadassa vuodessa. Korroosiota ei huomioida alapäästään suljettujen teräsputkipaalujen tai betonilla täytettyjen paalujen sisäpinnoilla. (RIL 254-1-2011)

*Taulukko 7 Korroosion aiheuttama keskimääräinen pinnan syöpymä maassa oleville suojaamattomille teräspaaluille (RIL 254-1-2011).*

<b>Korroosion aiheuttama seinämäpaksuuden menetys [mm]</b>					
Tavoitekäyttöikä	5 vuotta	25 vuotta	50 vuotta	75 vuotta	100 vuotta
<b>Tavanomaiset olosuhteet</b>					
Häiriintymättömät luonnonmaat (hiekkä, siltti, savi, liuskekivi)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Tiivistämättömät, ei-aggressiiviset kivennäismaatäytöt (hiekkä, siltti, savi, liuskekivi)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
<b>Tavanomaisesta poikkeavat tai aggressiiviset olosuhteet</b>					
Pilaantuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiiviset luonnonmaat (suo, räme, turve)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Tiivistämättömät ja aggressiiviset täytemaat (tuhka, kuona)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Olosuhteiden tavanomaisuus todetaan tavanomaisilla pohjatutkimuksilla tilanteissa, joissa ei ole syytä olettaa maapohjan pilaantuneen. Epävarmoissa olosuhteissa tulee tehdä erikoistutkimuksia, jotta varmistutaan etteivät aggressiivisen olosuhteen raja-arvot ylity. (SSAB:n teräsmaalut; Suunnittelu- ja asennusohjeet)

#### **Vaipaltaan injektoitu porapaalu**

Korroosio voidaan jättää huomiotta vaipaltaan injektoitujen paalujen mitoituksessa ei-aggressiivisessa ympäristössä, mikäli injektoinnin aikaansaama suojakerros täyttää seuraavan taulukon (taulukko 8) mukaiset vaatimukset. Taulukko on laadittu 100 vuoden käyttöiälle. Kerrospaksuusvaatimukset ovat vetorasitetuilla paaluilla suuremmat kuin puristusrasitetuilla. (RIL 254-1-2011)

*Taulukko 8 Ulkopuolisen suojakerroksen vähimmäispaksuudet tavanomaisissa maaperäolosuhteissa.*

<b>Suojakerroksen vähimmäispaksuus [mm]</b>		
	<b>Puristusrasitetut paalut</b>	<b>Veto- ja taivutusrasitetut paalut</b>
Injektointiaineet	20	30
Juotoslaasti	35	40
Betoni	50	50

Taulukossa 8 esitetyt suojakerroksen vähimmäispaksuudet täyttyvät käytännössä vain ylikoon avarrinkruunua ja injektointiainetta käytettäessä. Yleisesti käytössä olevilla ylikoon avarrinkruunuko'illa saavutetaan teoriassa suurimmillaan noin 30 mm välitys paaluputken ja kallion väliin. Normaalikoon avarrinkruunuilla taulukossa 8 esitetyt vaatimukset eivät täyty. Vaikka käytettäisiin riittävän suurta avarrinkruunua ohjeellisen väläyksen aikaansaamiseksi, ei korroosiosuojausta voi jättää pelkän injektointiaineen varaan, sillä injektointiaineen täydellisestä levittymisestä paaluputken ja kallion väliin ei voida varmistua. Kalliorako voi olla täyttynyt osin myös porasoihasta tai maa-aineksesta.

Rakenteellisen kestävyuden kannalta korroosioriski ei ole ongelma, sillä paaluputken seinämävahvuutta voidaan kasvattaa korroosiovaralla. Sen sijaan paaluputken ja injektointiaineen välisen tartunnan kannalta korroosio muodostaa riskin. Korrodoitumisen alussa tartunta ei heikkene, vaan paaluputken pintaan muodostuva pintaruoste voi jopa parantaa putken ja injektointiaineen välistä tartuntaa. Kun korrodoituneen kerroksen paksuus kasvaa, tartunta katoaa lähes täysin, ja kerros käytännössä leikautuu irti. (Satola, 2014)

Norjalaisen ohjeistuksen mukaan teräsydänpaalujen osalta vaadittu suojakerrospaksuus kallio-osuudella on vähintään 20 mm. (Peleveiledningen 2012)

Vaihtoehtoisesti injektoidun paalun laastiosuuden säilyvyyden ja suojauskyvyn suunnittelussa voidaan käyttää taulukkoa 9. Taulukossa on esitetty vaatimukset sekä sementtipohjaiselle injektointiaineelle (I) että juotoslaastille (J). Taulukko on laadittu 100 vuoden käyttöiälle. (RIL 254-1-2011)

*Taulukko 9 Taulukossa on esitetty vaatimukset injektoidun pienpaalun laastiosuuden säilyvyyden ja suojauskyvyn suunnittelua varten. (RIL 254-1-2011)*

Rasitustekijä	Ympäristö- olosuhde	Suurin w/c I/J	Pienin lieriölujuus [MPa] I/J	Laasti- kerroksen vähim- mäis- paksuus [mm] I/J	Muut vaatimukset
Kemiallinen rasitus	Ei kemiallista aggressiivisuutta Heikosti aggressiivinen Kohtalaisesti aggressiivinen Voimakkaasti aggressiivinen	0,55/0,6 0,50/0,55 0,50/0,45 0,45/0,40	25/25 30/30 30/35 35/40	20/35 20/35 25/40 30/40	Sulfaatinkes- tävä sementti Sideaine tapauskohtai- sesti
Kloridien aiheuttama korroosio	Kostea, harvoin kuiva Kostea ja kuiva vaihtelevat	0,50/0,50 0,40/0,40	30/30 40/40	25/30 35/40	
Jäätymis- /sulamisrasitus	Suuri vedellä kyl- lästyminen	0,50/0,50	30/30	20/35	Pakkasen- kestävyys todettava
Karbonatisoi- misen aiheutta- ma korroosio	Jatkuvasti märkä Ajoittain kuivumi- nen mahdollista	0,60/0,60 0,50/0,50	25/25 30/30	20/35 25/40	
Kuivuminen ja halkeiluriski	Suhteellinen kosteus jatkuvasti tai ajoittain alle 95 %	0,50/0,50	30/30	30/35	Halkeamat < 0,1 mm

Korroosio on kuitenkin huomioitava aggressiivisessa ympäristössä. Tällöin on käytettävä joko suurempaa suojakerrospaksuutta kuin taulukossa 9 on esitetty, suurempaa korroosiovähennystä teräspoikkileikkauksessa, orgaanisia tai epäorgaanisia pinnoitteita, pysyvää suojaputkea tai katodista suojausta. (RIL 254-1-2011)

### 3.2.4 Paalun alapään momenttijäykkyys

Paalun ja kallion kontakti voidaan olettaa momenttijäykäksi, kun poraussyvyys ehjään kallioon on vähintään 4 x ulkohalkaisija ja paalun ja kallion välinen väli huuhdellaan puhtaaksi sekä injektoidaan täyteen sementtilaastilla. Momenttijäykkä kiinnitys on mahdollista toteuttaa myös rakentamalla paalun alapäähän momenttijäykkä teräsbetonirakenne. Mikäli paalun ja kallion välistä kontaktia ei tehtäisikään momenttijäykäksi, tulee rakenteen kestävyys kuitenkin tarkistaa olettaen paalun kiinnitys momenttijäykäksi. (Liikenneviraston ohjeita 11/2012)

### 3.2.5 Vanha ohjeistus

Ennen Porapaalutusohjeen (TIEH2000002-001) käyttöönottoa suunnitteluohjeet salivat paalulle tulevan vetorasituksen suuruudeksi korkeintaan paalun oman painon verran. Tästä johtuen näin toimitaan osin edelleenkin. (Heikinheimo 2014)



### 3.3 Kallioankkuri

Kallioankkurin tehtävä on välittää yläpuolisesta rakenteesta aiheutuvat vetokuormitukset peruskallioon.

Vetoankkureissa mitoitetaan rakenteellinen kestävyys sekä kalliojuotoksen kestävyys.

Kalliojuotoksen mitoituksessa on huomioitava juotoksen irtileikkautuminen kallion ja injektointilaastin välillä sekä injektointilaastin ja teräksen välillä. Lisäksi on varmistettava, että kallioista irtoavan kartion paino on riittävä. (RIL 263-2014)

#### 3.3.1 Rakenteellinen kestävyys

Ankkureiden rakenteellinen vetokestävyys on pienempi seuraavista arvoista: ankkureiden kierteiden vetokestävyys  $F_{tt,Rd}$  tai ankkurin varren vetokestävyys  $F_{tg,Rd}$ . (SFS-EN 1993-5)

Ankkureiden kierteiden vetokestävyys  $F_{tt,Rd}$  saadaan kaavasta 10:

$$F_{tt,Rd} = \frac{k_t x f_{ua} x A_s}{\gamma_{M2}} \quad (10)$$

missä	$k_t$	kerroin, jonka arvo annetaan kansallisessa liitteessä, Suomen kansallisen liitteen mukaan 0,9, kun taivutusmomentteja ankkureille ei synny
	$A_s$	jännityspoikkipinta-ala kierteiden kohdalla [mm <sup>2</sup> ]
	$f_{ua}$	teräsankkurin vetolujuus [MPa]
	$\gamma_{M2}$	osavarmuusluku

Ankkurin varren vetokestävyys  $F_{tg,Rd}$  saadaan kaavasta 11:

$$F_{tg,Rd} = \frac{A_g x f_y}{\gamma_{M0}} \quad (11)$$

missä	$A_g$	ankkuritangon bruttopoikkipinta-ala [mm <sup>2</sup> ]
-------	-------	--------------------------------------------------------

#### 3.3.2 Kalliojuotoksen kestävyys

Ankkurin kalliojuotoksen vetokestävyys mitoitussarvo saadaan kaavasta 12:

$$P_d = \pi x d x L x \tau_d \quad (12)$$

missä	$P_d$	on vetokestävyysmitoitussarvo [kN]
	$d$	porareian halkaisija [m]
	$L$	juotospituus [m]
	$\tau_d$	juotoksen tartunnan mitoituslujuus [kN/m <sup>2</sup> ]

Kaavaa 12 käytetään kalliojuotoksen vetokestävyysmitoitavassa mitoituksessa. Kalliojuotoksen kestävyys todennetaan koevedolla.

### Kallio-injektointilaasti-juotos

Mitoituslujuutena  $\tau_d$  voidaan käyttää enintään 1 MPa, ellei ennakkokokein pystytä osoittamaan suurempaa arvoa. Mikäli ankkurointi tehdään hiekkakiveen, voidaan ilman ennakkokokeita käyttää enintään arvoa 0,5 MPa. (RIL 263-2014)

### Teräs-injektointilaasti-juotos

Mikäli ankkurina käytetään koko poikkileikkaukseltaan vakiomittaista tankoa, tulee tangon ja injektointilaastin välisen juotoksen kestävyys tarkistaa.

Injektointilaastin ja teräksen välinen tartunta lasketaan samaan tapaan kuin injektointilaastin ja kallion välinen tartuntakapasiteetti. Tartunnan mitoituslujuus lasketaan kaavalla 13 (RIL 254-1-2011):

$$\tau_{s;k} = \frac{k_b \times f_{ctk}}{\gamma_R} \quad (13)$$

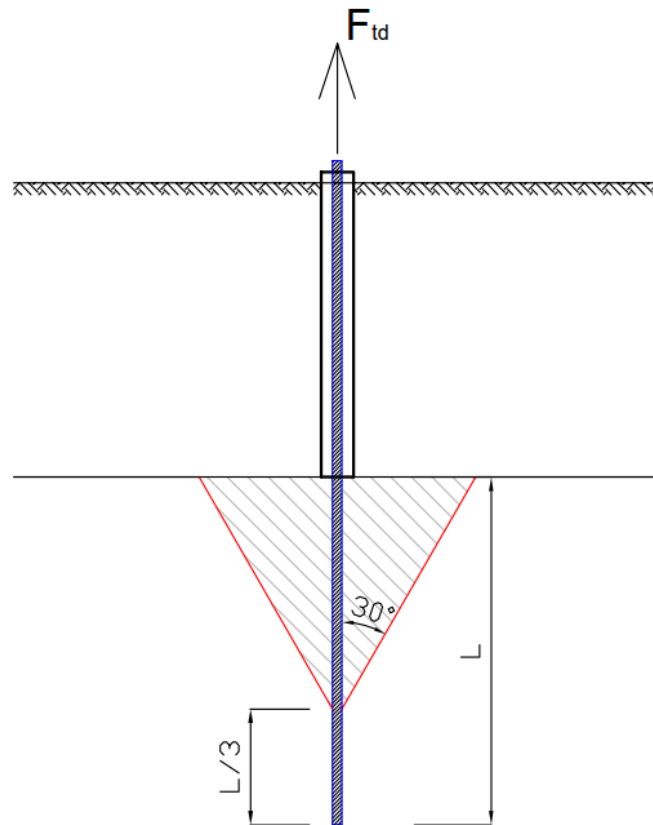
missä	$k_b$	on ankkurin pinnan muodosta johtuva tartuntakerroin
		<ul style="list-style-type: none"> <li>o sileä pinta <math>k_b = 0,7</math></li> <li>o kierteytetty pinta <math>k_b = 2,4</math></li> </ul>
	$f_{ctk}$	betonin/laastin vetolujuuden ominaisarvo, taulukko 10
	$\gamma_R$	osavarmuusluku
		<ul style="list-style-type: none"> <li>o 1,5 (pitkäaikainen kuormitus)</li> <li>o 1,25 (tilapäinen kuormitus)</li> </ul>

*Taulukko 10 Betonin, juotoslaastin tai injektointiaineen vetolujuuden ominaisarvo (RIL 254-1-2011).*

Betonin/laastin/injektointiaineen lujuusluokka	Betonin/laastin/injektointiaineen vetolujuuden ominaisarvo $f_{ctk}$
C20/25	1,5
C25/30	1,8
C30/37	2,0
C35/45	2,2
C40/50	2,5
C45/55	2,7

### 3.3.3 Kalliokartion paino

Kalliokartion suuruus määräytyy siten, että kallioista voi irrota leikkautumatta kartion muotoinen kappale (kuva 28). Kartion kärkikulmaksi oletetaan 60°, ja kappaleen kärki lähtee etäisyydeltä  $1/3 \times$  ankkurin juotospituus ankkurijuotoksen alapäästä lukien. (RIL 263-2014)



Kuva 28 Periaatekuva kalliokartion tilavuuden muodostumisesta.

Kalliokartion tilavuus saadaan kaavasta 14:

$$V = \frac{\pi x \left[ \left( \frac{2}{3} x L \right) x \tan(30^\circ) \right]^2 x \frac{2}{3} x L}{3} \quad (14)$$

missä  $L$  on ankkurin asennussyvyys kallioon.

Mikäli lähekkäin olevien ankkureiden kalliokartiot leikkaavat toisiaan, kartioiden tilavuutta on vähennettävä päällekkäisyyden vuoksi.

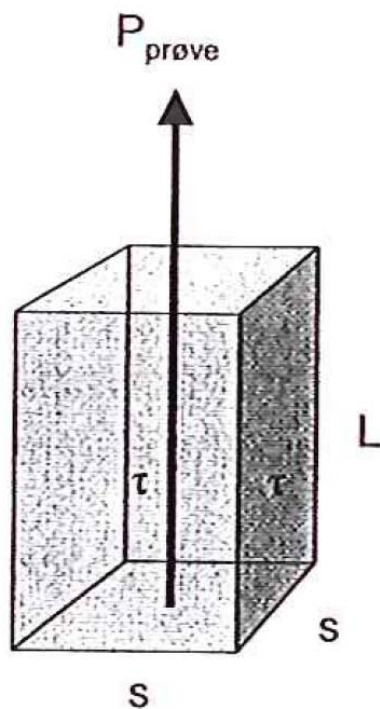
Kalliokartion paino saadaan kaavasta 15:

$$G = V x \gamma' x \gamma_G \quad (15)$$

missä  $V$  on kalliokartion tilavuus  
 $\gamma'$  kappaleen tehokas tilavuuspaino juotostasossa, pohjavedenpinnan yläpuolella 25 kN/m<sup>3</sup>  
 $\gamma_G$  edullisen kuorman varmuuskerroin, Suomessa 0,9

### Norjalainen ohjeistus

Norjalaisen ohjeen mukaan kallioista voi irrota leikkautumalla suorakulmaisen särmiön muotoinen kalliokappale. Kuvassa 29 on esitetty norjalaisen ohjeistuksen mukainen kalliosärmiö. (Spunt og avstivede byggeproper)



Kuva 29 Norjalaisen ohjeistuksen mukainen kalliosärmiö mittoineen.

Kalliojuotoksen riittävä pituus saadaan kaavasta 16:

$$L = \frac{P_{koeveto}}{\gamma' \times S^2 + 4 \times S \times \tau_{kallio-kallio}} \quad (16)$$

missä	L	on juotospituus [m]
	$P_{koeveto}$	koevetovoima [kN]
	$\gamma'$	tehokas tilavuuspaino [kN/m <sup>3</sup> ]
	S	pohjan sivu [m], tyypillisesti 1m
	$\tau_{kallio-kallio}$	leikkauslujuuden ominaisarvo [kN/m <sup>2</sup> ], tyypillisesti 100 kN/m <sup>2</sup>

Kalliojuotoksen irtileikkautuminen lasketaan norjalaisessa ohjeistuksessa kuten Suomessakin. Norjalaisen ohjeistuksen mukaan injektointilaastin ja kallion välisen tartunnan mitoituslujuuden arvo valitaan väliltä 0,8–2,0 MPa. Suomalaisen ohjeistuksen mukaan mitoituslujuutena käytetään enintään 1,0 MPa.

Teräksen ja injektointilaastin välinen tartunta lasketaan norjalaisessa ohjeistuksessa kuten suomalaisessakin. Norjalaisen ohjeistuksen mukaan tartuntalujuuden mitoitussarvona käytetään 2,0 MPa. Suomalaisen ohjeistuksen mukaan tartuntalujuus määritetään injektointilaastin vetolujuuden ominaisarvon ja teräksen pinnan muodosta johtuvan tartuntakertoimen tulona.

### 3.3.4 Koeveto

Ankkureiden koeveto tulee suorittaa hyväksyntäkokeella, soveltuvuuskokeella tai tutkimuskokeella. Kokeet voidaan suorittaa 3 eri koemenetelmällä. Kokeiden yksityiskohtainen toteutus on esitetty standardiluonnoksessa prEN ISO 22477–5.

Mikäli käytetään ankkurityyppejä, joista on Suomessa aiempaa kokemusta, tehdään vain hyväksyntäkoee. Tämä on yleisin tapa toimia. Käytettäessä uusia ankkurityyppejä tulee tehdä soveltuvuus- ja tutkimuskoee.

Hyväksyntäkoee tehdään rakennuspaikalla, ja kokeella varmistetaan, että ankkuri täyttää mitoitusvaatimukset ts. osoitetaan, että ankkuria voidaan vetää sille suunnitellulla koevetovoimalla sekä varmistetaan, että ankkuriin voidaan jättää suunniteltu jättövoima. Hyväksyntäkoee tulee tehdä kaikille pysyvän kuorman rasittamille ankkureille sekä vähintään 20 % muuttuvan kuorman rasittamille ankkureille. Tutkimuskokeilla testataan, että ankkurin rakenne ja rakenneosat kestävät hyväksyttävästi valmistajan ilmoittamat rasitukset. Soveltuvuuskokeilla varmistetaan ankkurin soveltuvan ja olevan käyttökelpoinen vallitsevissa käyttöolosuhteissa. (RIL 263-2014)

Ankkuri tulee valita siten, että seuraava epäyhtälö toteutuu

$$P_p < 0,9 P_{t0,1}$$

missä  $P_p$  on ankkurin koevetovoima  
 $P_{t0,1}$  on ankkurin vetovoima, joka vastaa 0,1 % venymää.

Koevetovoiman tulee toteuttaa yhtälöt

$$P_p > 1,25 P_d \quad (\text{väliaikainen ankkuri})$$

$$P_p > 1,50 P_d \quad (\text{pysyvä ankkuri})$$

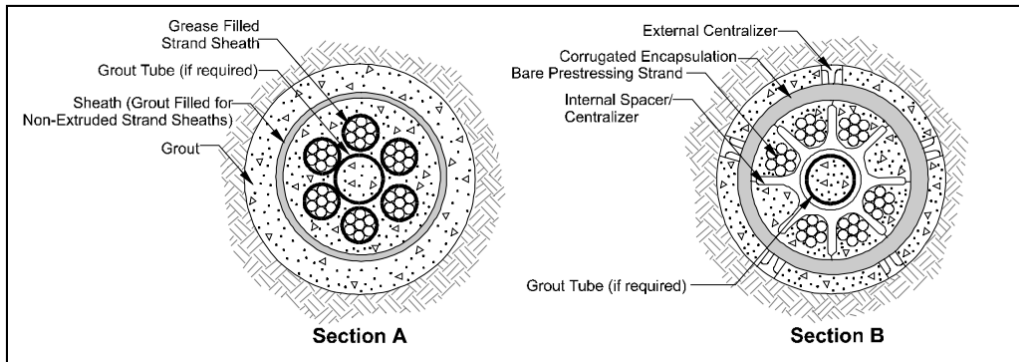
Koevetovoima voi käytännössä suurimmillaan olla 4 MN. (RIL 263-2014)

Mikäli koevetoa ei voida suorittaa, tulee laskennalliseen ankkurointipituuteen lisätä 20 %. (Liikenneviraston ohjeita 11/2012)

### 3.3.5 Korroosio

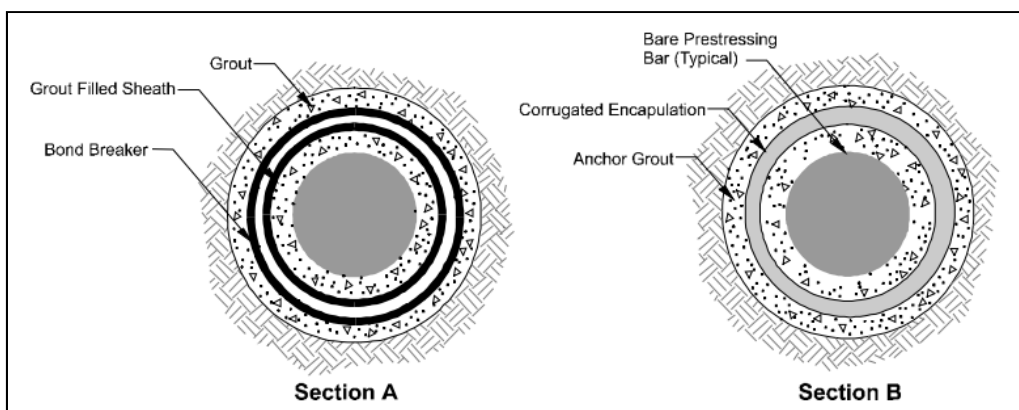
Kaikki teräsosat on suojattava korroosiolta niiden suunnitellun käyttöiän ajaksi. Korroosiosuojausosien on kyettävä välittämään voimat, jotka niiltä vaaditaan. Kaikki asennetut jännepunokset sekä kapselit on suojattava vähintään 10 mm paksulla injektointiainekerroksella tartuntaosuudella. (SFS-EN 1537)

Pysyvä ankkuri tulee suojata ns. kaksinkertaisella korroosiosuojauksella. Punosankkureissa ankkuriteräkset ovat kallioreiässä muovisen suojaputken sisällä injektointisementtilietteenä (kuva 30). Sementtiliete ei saa sisältää yli 0,1 % klorideja, sulfideja tai nitraatteja. Muoviputken seinämävahvuuden on oltava vähintään 1 mm, jos käytetään aallotettua putkea ja 2 mm mikäli käytetään sileää putkea. Toinen suojaava laastikerros muodostuu ankkurin injektointivaiheen yhteydessä. Venymäosuudella teräkset ovat muovisen suojaputken sisällä korroosiosuojarasvassa. (RIL 263-2014; SFS-EN 1537)



Kuva 30 Punosankkurin kaksinkertainen korroosiosuojaus. (Geotechnical engineering Circular 4)

Tankoankkurilla kaksinkertainen korroosiosuojaus toteutetaan käyttämällä korroosiosuojaavaa pinnoitetta tangon pinnassa sekä injektoinnin yhteydessä muodostuvaa laastikerrosta tangon ja kallion välissä. Korroosiosuojapinnoite voidaan myös korvata tangon ympärille asennettavan suojaputken (kuva 31) avulla. Muoviputken seinämävahvuuden on oltava vähintään 1 mm, jos käytetään aallotettua putkea ja 2 mm mikäli käytetään sileää putkea. Suojaputken ja tangon välinen tila täytetään injektointiaineella. (RIL 263-2014; SFS-EN 1537; Mansikkamäki 2014,2)



Kuva 31 Tankoankkurin kaksinkertainen korroosiosuojaus. (Geotechnical Engineering Circular 4)

Pora-ankkuri suojataan kierretangon ja jatkosholkin sinkityksellä sekä epoksinpinoitella. Porauksessa ankkurin ympärille muodostuu huuhteluliitteestä sementtivaippa, joka toimii myös korroosiosuojana. Ankkurin lukituspää korroosiosuojataan tarvittaessa betonoimalla teräsrakenteet. (RIL 263-2014)

## 4 Toteutettuja kohteita

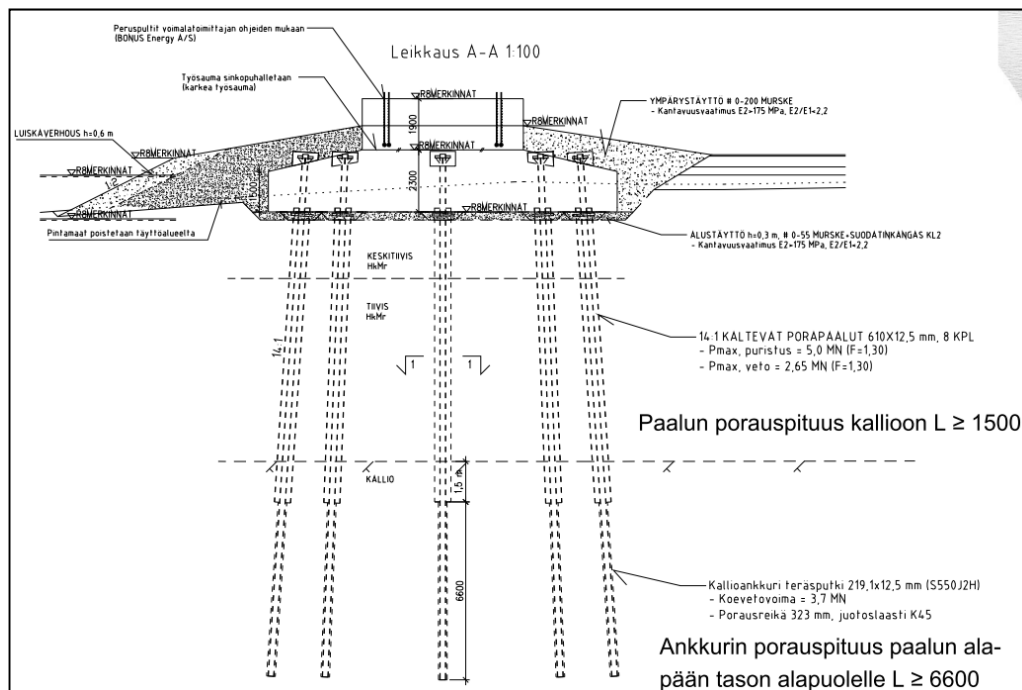
Tähän lukuun on koottu erityyppisiä kohteita, joissa ankkuroituja porapaaluja on käytetty perustusrakenteina.

### 4.1 Raahen tuulivoimala

Raahen tuulivoimalahanke toteutettiin vuonna 2004 KVR-urakkana. Kohteeseen rakennettiin 5 kpl 2,3 MW:n tuulivoimalaa.

#### Pohjasuhteet

Pinnassa oli 3,5...4 m paksu täyttömaakerros. Täytön alla oli keskitiivistä hiekkamoreenia tasolle n. -5,0. Tämän kerroksen alapuolella oli n. 6 m paksu kerros tiivistä hiekkamoreenia. Kallionpinta oli tasolla -11,5...-12,0.



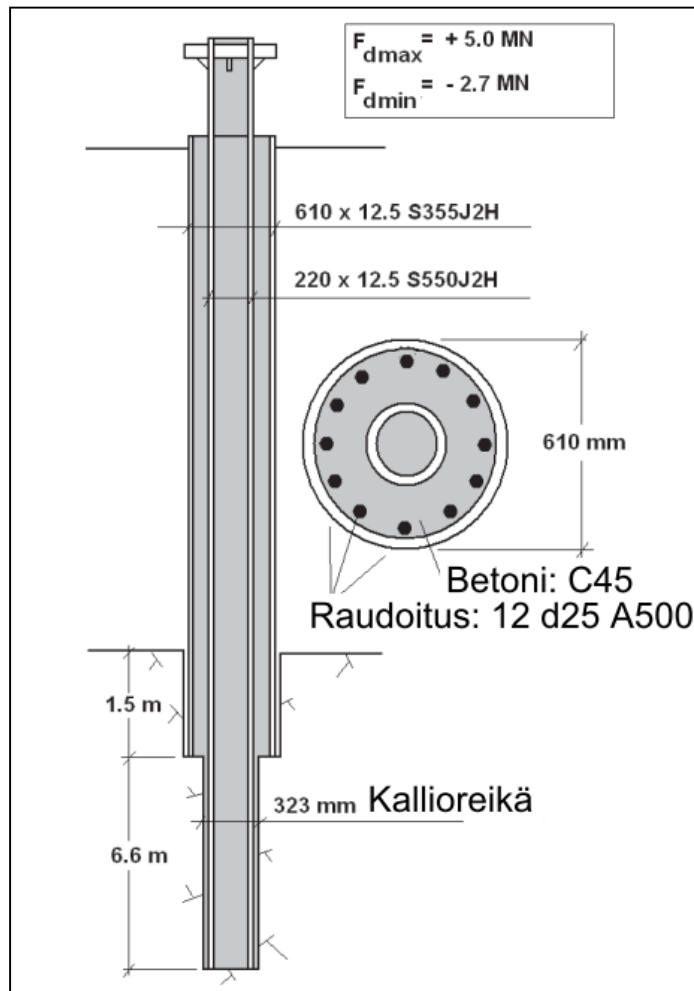
Kuva 32 Tuulivoimalan porapaaluperustuksen yleisleikkaus. Kohteessa käytettiin porapaaluja, jotka ankkuroitiin teräspultkiankkureilla. (Suunnitelmakoelma Raahen)

#### Kuormat

Tuulivoimaloihin kohdistui mitoitusnopeudesta ( $v = 55$  m/s) aiheutuvia suuria vaakakuormia. Vaakakuormista aiheutui anturan alapinnan tasossa suuri kaatava momentti ( $M = 78$  MNm). Momentti aiheutti paaluille rajut vetorasitukset. Mitoitusvetokuorma oli 2,65 MN. Normaaliolosuhteissa (tuulennopeus  $v = 24$  m/s  $\rightarrow M = 27$  MNm) kaikki paalut olivat puristettuja. Paalut olivat siis vetorasitettuja vain tietyissä kuormitustilanteissa.

### Rakenne

Kohteessa käytettiin läpimitaltaan 610 mm teräspuikiporapaaluja, jotka porattiin 1,5 m syvyyteen kallioon (kuva 32). Porapaalut ankkuroitiin läpimitaltaan 220 mm teräspuikiankkureilla kallioon (kuva 33). Ankkurit ulotettiin 6,6 m syvyyteen kallioon, johon ne injektointiin juotoslaastilla K45. (Suunnitelmakokoelma Raahe)



Kuva 33 Leikkauskuva Raahen tuulivoimalan perustusrakenteesta. (Pätkommissionen 2010, muokattu)

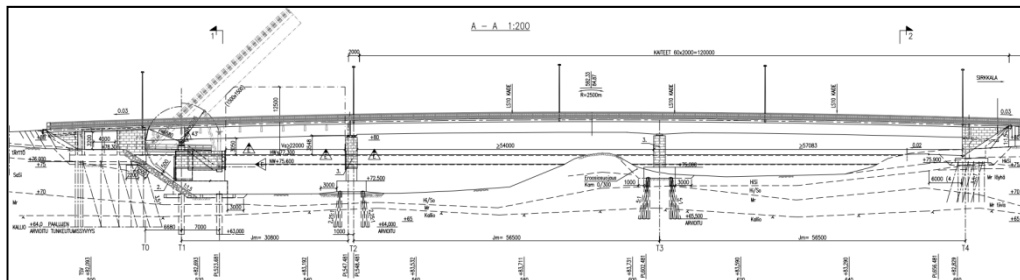
### Koekuormitus

Ankkurit koevedettiin 3,7 MN voimalla, joka on 1,8 x ominaiskuorma. Koevedot suoritettiin jatkosputken avulla porapaalua vasten.



## 4.2 Sirkkalan silta, Joensuu

Kohde sijaitsi Yläsatamakadun jatkeena Joensuussa. Silta muodostui kolmesta osasta: betonisesta kehäsillasta, avattavasta teräksisestä läppäsillasta sekä jännitetystä palkkisillasta (kuva 34). Tuet T1, T2 ja T3 perustettiin porapaalujen varaan.



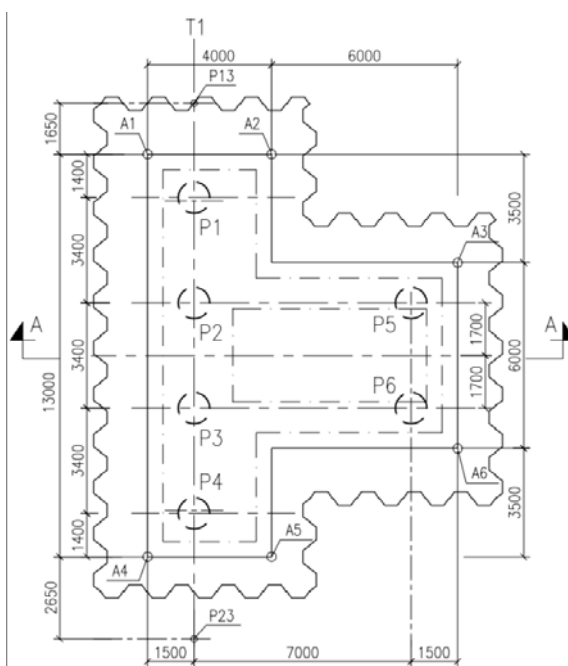
Kuva 34 Yleiskuva Sirkkalan sillasta.

### Pohjasuhteet

Tuilla T1 ja T2 vesisyvyys oli 5,6...7,3 m. Uoman pohjalla oli ensin noin 2 m kerros löyhää hiekkaa ja soraa, jonka alla oli moreenia. Kallionpinta oli 3–4 m syvyydessä uoman pohjasta. Tuen T3 kohdalla vesisyvyys oli 1–4 m. Pohjamaa koostui 1–3 m paksusta silttisestä hiekkakerroksesta ja 4 m paksusta moreenikerroksesta. Kallionpinta oli 6–7,5 m syvyydessä uoman pohjasta.

### Kuormat

Suurimmat vetokuormat kohdistuivat tuella T1 paaluille P1, P4, P5 ja P6 (kuva 35). Vetokuorman mitoitusarvo oli 1,85 MN. Ankkureina käytettiin läpimitaltaan 63,5 mm tankoankkureita. Paaluilla P2 ja P3 vetokuorman mitoitusarvo oli 0,73 MN. Ankkureina käytettiin läpimitaltaan 43 mm tankoankkureita.

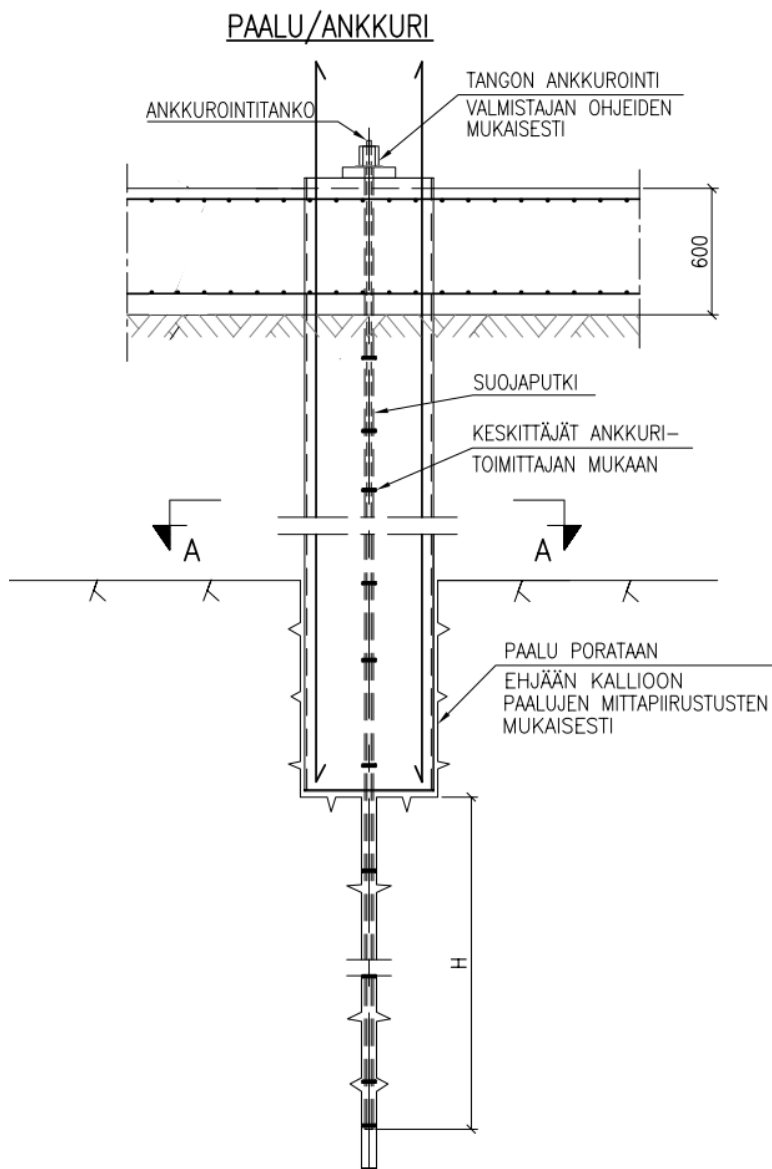


Kuva 35 Kuvassa tuen T1 tasokuva. Suurimmat vetokuormat kohdistuvat paaluille P1, P4, P5 ja P6.

Tuella T2 paaluille P3, P4, P7 ja P8 kohdistui 1,30 MN mitoitusvetokuorma. Ankkureina käytettiin läpimitaltaan 57,5 mm tankoankkureita. Paaluilla P1, P2, P9 ja P10 veto-kuorman mitoitusarvo oli 0,85 MN. Ankkureina käytettiin läpimitaltaan 43 mm tankoankkureita.

### Rakenne

Teräspuikiporapaalut ankkuroitiin tuilla T1 ja T2 kallioon erillisillä ankkureilla (kuva 36). Tuella T1 paalut (RD1016/20) porattiin 3 m syvyyteen ehjään kallioon. Tuella T2 paalut (RD610/12,5) porattiin 2 m ehjään kallioon. Paaluputken ulkopinnan ja kallion välinen, avartimen levyinen tyhjätila injektointiin täyteen porauksen jälkeen. Injektointi suoritettiin paaluputkien sisäpintaan ennen porausta asennettavia teräksisiä injektointiputkia pitkin. Porauksen jälkeen väli huuhdeltiin ilmalla tai vedellä injektointiputkien kautta ja injektointiin vesi-sementtimassalla. Massamäärä oli 3-kertainen paalun ja kallion väliseen teoreettiseen tilavuuteen nähden. (Suunnitelmakokoelma Sirkkan silta)



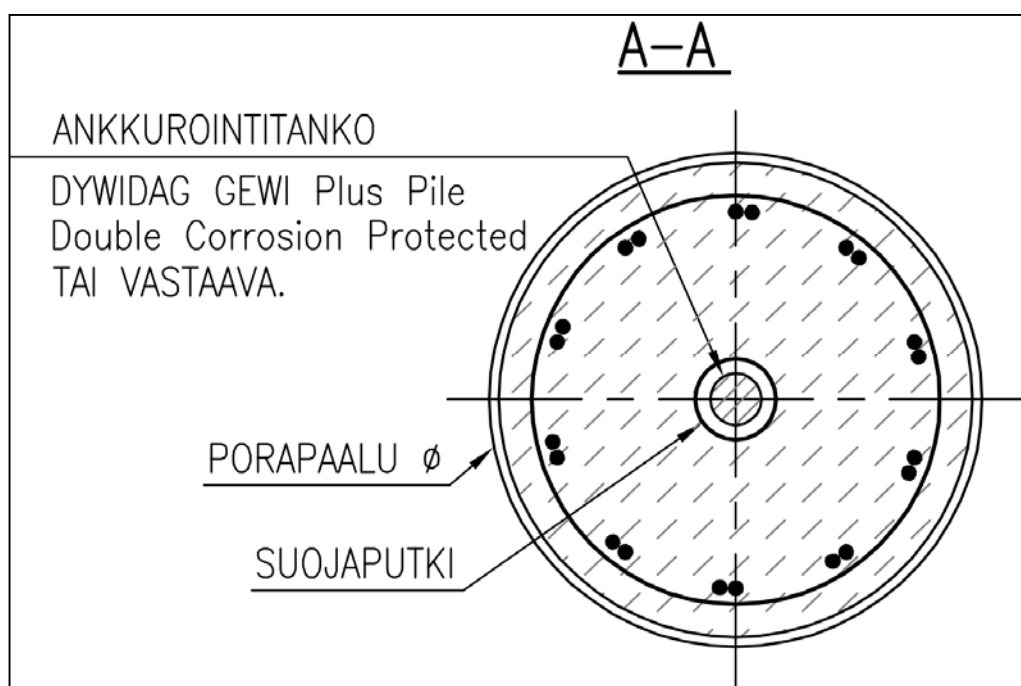
Kuva 36

Leikkauskuva Sirkkan sillan ankkuroinnista.

Työvaiheistus on kuvattu alla.

1. Poraus paalun läpi ja huuhtelu
2. Ankkurien suojaputken upotus vähintään 1 m paalun alapään tason alapuolelle
3. Ankkurien reikäporaus
4. Vesipainekoe
5. Injektointi
6. Aukiporaus
7. Vesimenekkikoe
8. Keskittäjillä varustettujen ankkurien asennus ja injektointi
9. Koeveto lujittumisajan jälkeen (1,3 x jättövoima)
10. Paalujen raudoitus ja valaminen

Kuvassa 37 on esitetty leikkaus A-A kuvan 36 teräspuikiporapaalun ankkuroinnista.



Kuva 37 Leikkauskuva teräspuikiporapaalusta, jonka sisällä tankoankkuri.

## 4.3 Lauttasataman lauttapaikka, Norrskata

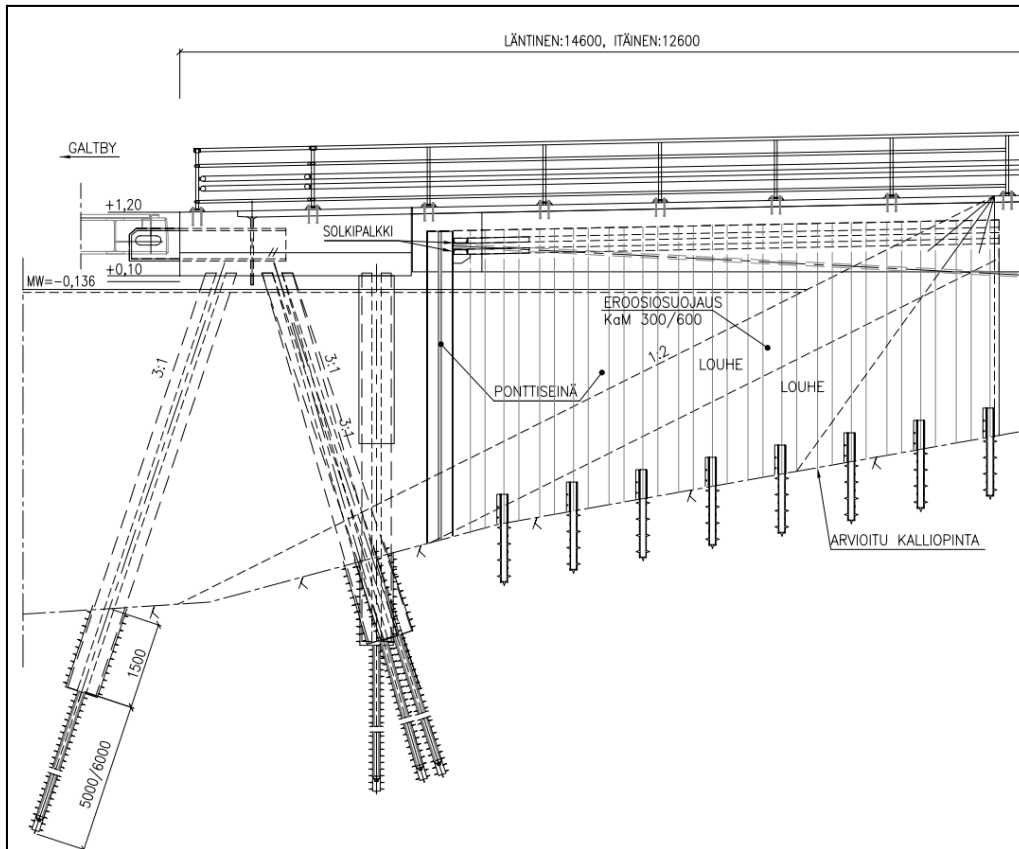
Norrskata on saari Lounais-Suomessa Paraisten kaupungissa. Norrskataan rakennettiin uusi lauttapaikka vuosien 2012 ja 2013 aikana. Lauttapaikan rakentaminen sisälsi uuden maatukirakenteen rakentamisen, kahden uuden tihtaalin rakentamisen sekä maatuen tulopenkereen rakentamisen.

### 4.3.1 Maatuki

Maatukirakenne perustettiin kallioon ankkuroiduilla porapaaluilla (kuva 38 ja kuva 39).

#### Pohjasuhteet

Kalliopinnan taso vaihteli tasolla –2,0...–6,5. Vedenpinnan korkeus vaihteli tasolla –0,7...+1,2.



Kuva 38 Leikkauskuva maaturakenteen perustamisesta.

### Kuormat

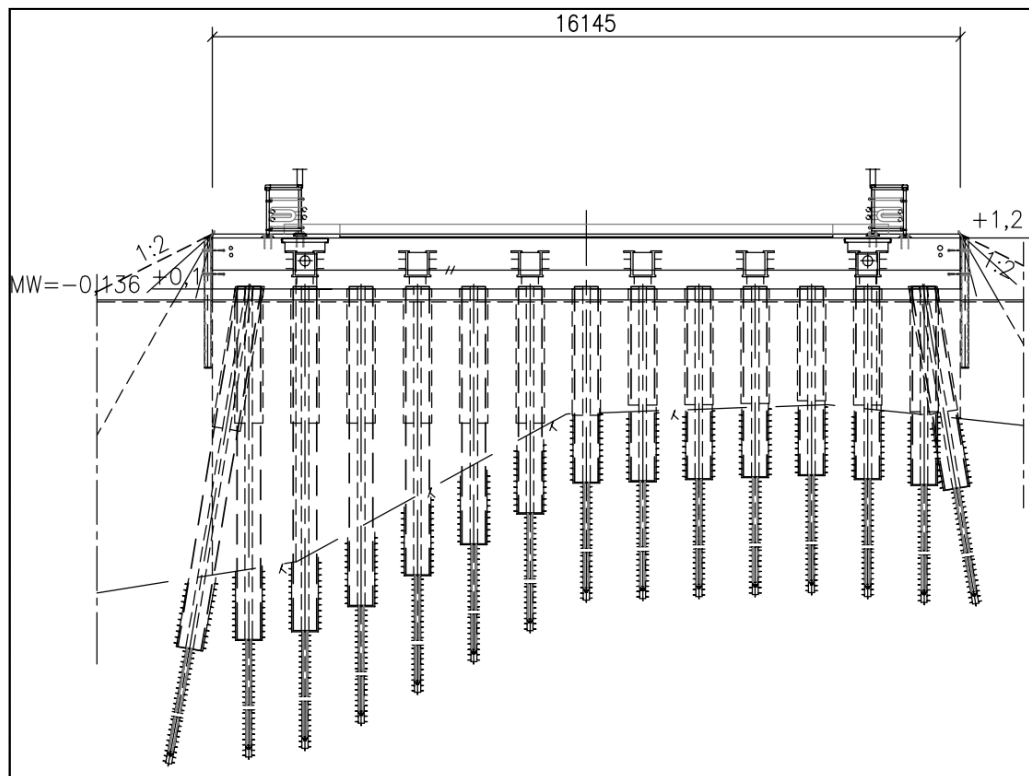
Paaluihin kohdistuvien vetovoimien suuruus vaihteli 200–780 kN.

### Rakenne

Porapaalut olivat läpimitaltaan 508 mm ( $t = 12,5\text{mm}$ ) ja niitä oli 22 kpl. Paalut porattiin 1,5 m ehjään kallioon. Vetovoimien vastaanottamiseksi paalut ankkuroitiin läpimitaltaan 40 mm (S500/550) tai 63,5 mm (S555/700) ankkuritangoilla kallioon. Ankkurit asennettiin 5 – 6 m syvyyteen. Ankkuritangot injektointimassalla, jonka nimellislujuus oli 45 MPa. Vetolujuusvaatimuksena koevetohetkellä oli 1,5 MPa.

### Koeveto

Kaikki ankkuritangot koevedettiin. D40 ankkurit koevedettiin 450 kN voimalla ja D63,5 ankkurit 1130 kN voimalla. Koeveto tehtiin ennen paalujen betonointia.



Kuva 39 Leikkauskuva maaturakenteen perustamisesta.

#### 4.3.2 Tukitihtaalit

Lautta-alusten tukeutumista varten rakennettiin kaksi tukitihtaalia, jotka perustettiin myös kallioon ankkuroiduille porapaaluille (kuva 40).

#### Pohjasuhteet

Kallionpinta oli tasolla n. -6,5. Veden korkeus vaihteli tasolla -0,7...+1,2.



Kuva 40 Tukitihtaalit perustettiin ankkuroitujen porapaalujen varaan.

### Kuormat

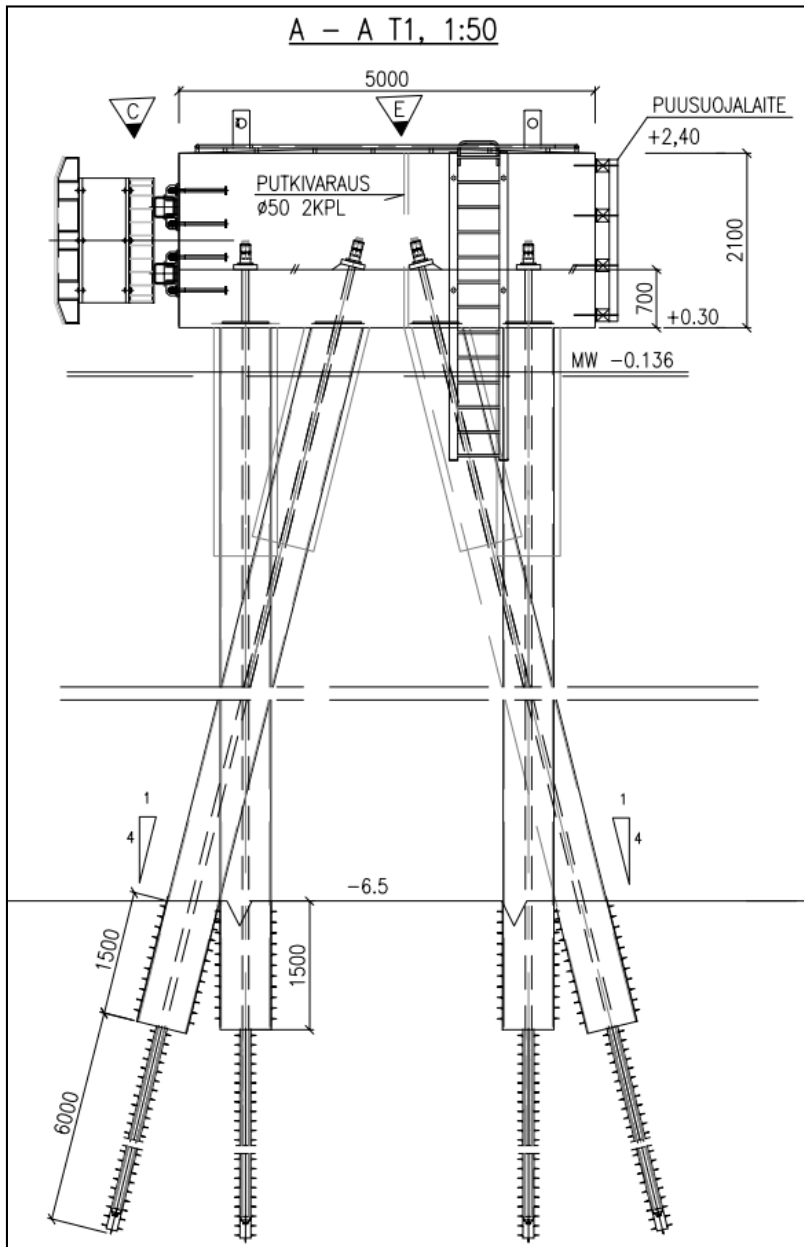
Paaluihin kohdistuvien mitoitusvetovoimien suuruus vaihteli 240–1680 kN. Suuret vetokuormat aiheutuivat alusten tukeutumisen yhteydessä tapahtuvista törmäystilanteista.

### Rakenne

Porapaalut olivat läpimitaltaan 610 mm ( $t = 12,5$ ) ja niitä oli 6 kpl tihtaalia kohden. Paalut porattiin vähintään 1,5 m ehjään kallioon. Vetovoimien vastaanottamiseksi paalut ankkuroitiin läpimitaltaan 63,5 mm ankkuritangoilla kallioon (kuva 41). Ankkurit asennettiin 6 m syvyyteen kallioon. Ankkuritangot injektointimassalla, jonka nimellislujuus oli 45 MPa. Vetolujuusvaatimuksena koevetohetkellä oli 1,5 MPa.

### Koeveto

Kaikki ankkuritangot koevedettiin 1130 kN voimalla. Koeveto tehtiin ennen paalujen betonointia.

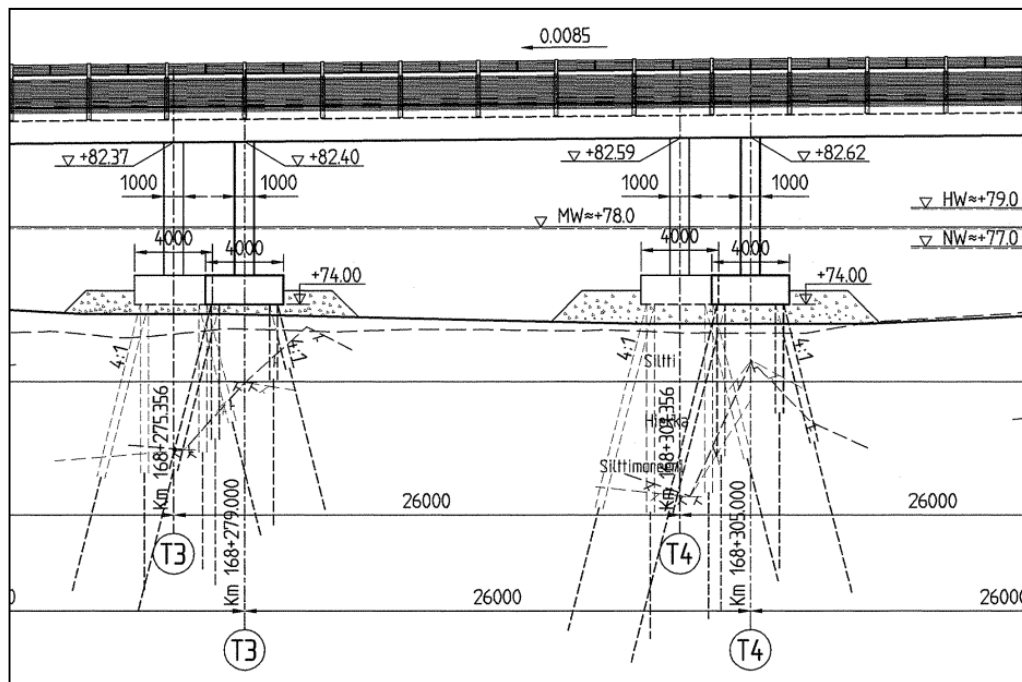


Kuva 41

Leikkauskuva tukitihtaalin perustusrakenteesta.

## 4.4 Kuokkalankosken ratasilta

Kuokkalankosken ratasilta sijaitsee Lempäälässä Helsinki-Tampere-pääradan rata-km:llä 168+288. Sillan maatuot perustettiin osin kallion ja osin maan varaan. Sillan välituet perustettiin porapaaluille (kuva 42).



Kuva 42 Ote sillan yleispiirustuksesta välitukien T3 ja T4 kohdalta.

### Pohjasuhteet

Päällimmäisenä maakerroksena oli 3 – 4 m paksu silttikerros, jonka alla on 5 m paksu hiekkakerros. Kalliopinta oli välitukien T3 ja T4 kohdalla 1–9 m syvyydessä uoman pohjasta.

### Kuormat

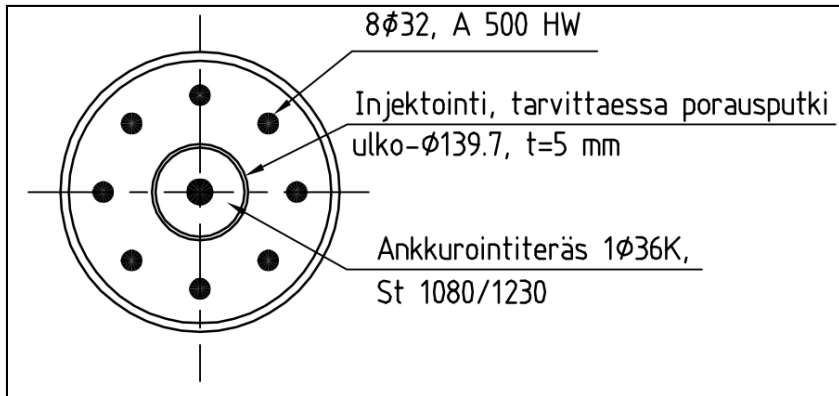
Vetokuormitus oli hetkellinen, ja pysyvässä tilanteessa paaluihin kohdistui puristuskuormitus. Vetokuorman mitoitusarvo oli 0,73 MN. Ankkureina käytettiin läpimitaltaan 36 mm tankoankkureita (St 1080/1230). Tankoankkurit asennettiin 6...8 m syvyyteen kallioon.

### Rakenne

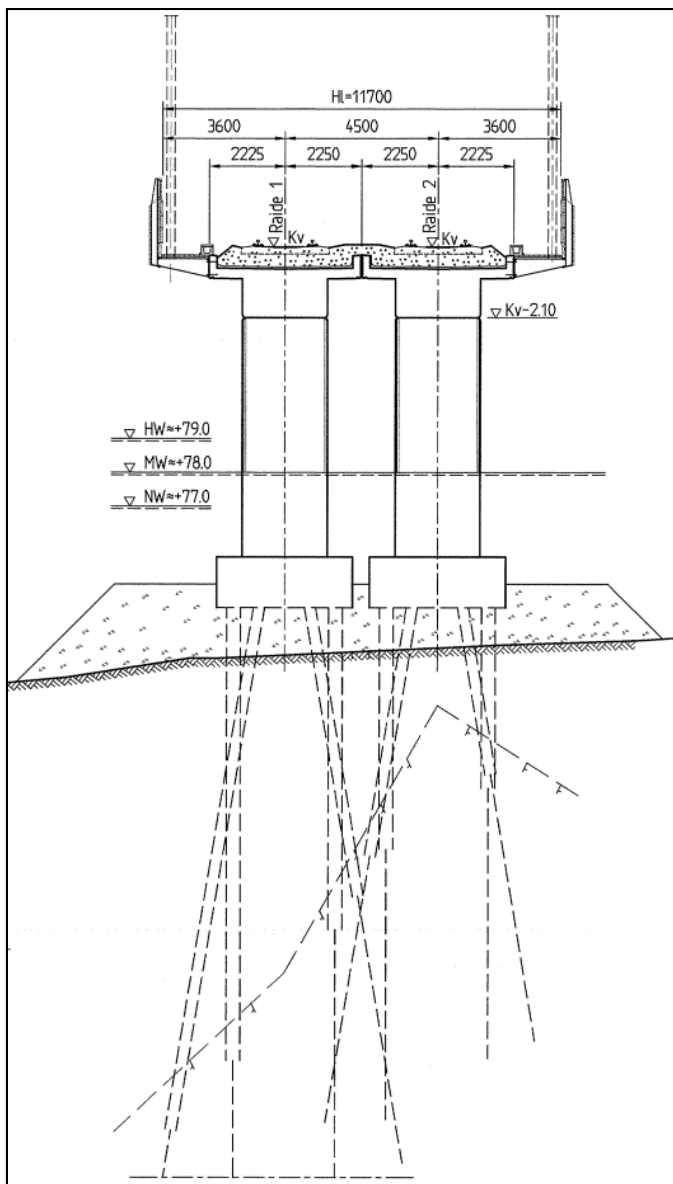
Välituet T3 ja T4 perustettiin vedenpinnan alapuolelle läpimitaltaan 323 mm ja 406 mm porapaalujen varaan (kuva 44). Porapaalut porattiin vähintään metrin verran kallioon. D406 mm porapaaluihin kohdistui puristuskuorman lisäksi vetokuormitus, joten paalut ankuroitiin kallioon tankoankkureilla (kuva 43).

### Koeveto

Ankkurointiteräksset koevedettiin vedenpinnan yläpuolelta porapaalua vasten.



Kuva 43 RD406/12,5 -paalun ankkurointi sekä raudoitus.



Kuva 44 Leikkauskuva välitukien T3 ja T4 kohdalta.



### Työsuoritus

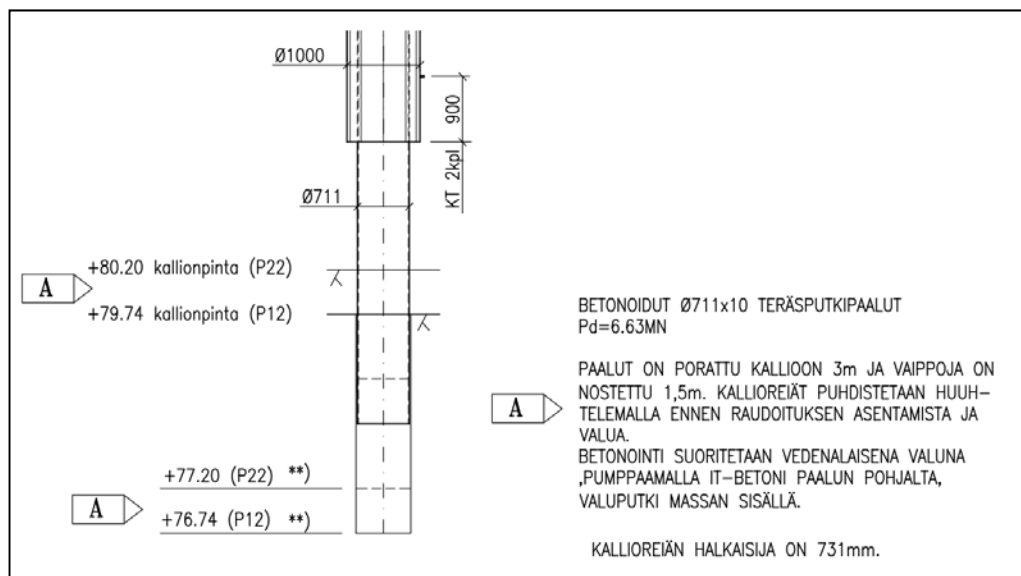
Porapaalutustyö suoritettiin suojaputkiporausmenetelmällä. Avarrinkruunu jäi kerta-käyttöisenä porausreiän pohjalle. Porapaalun porausputki kruunuineen upotettiin maakerrostumien läpi kallioon uppovasaralla. Suojaputken tiivis kalliokontakti varmistettiin iskemällä porakoneen vasaralla putken päähän. Tämän jälkeen keskittäjillä varustettu raudote laskettiin putkeen, ja paalu betonoitiin vedenalaisena valuna. Betonoinnin jälkeen paalun yläpää suojattiin.

## 4.5 Täyttökanavan silta S3, Ilmajoki

VT 19 Seinäjoen ohitustie -hankkeessa Täyttökanavan sillalla käytettiin kallioon momenttijäykästi asennettuja teräsputkiporapaaluja. Asennuksessa käytettiin Styrod Boreal Oy:n asennusmenetelmää.

### Työsuoritus

Menetelmässä porapaalu porattiin ensin 3 m syvyyteen kallioon. Tämän jälkeen porapaalua nostettiin 1,5 m ylöspäin, ja paalu betonoitiin ja raudoitettiin (kuva 45). Paalua kannateltiin, kunnes betonimassa oli kovettunut riittävästi. Menetelmällä paalun ja kallion välisestä kontaktista saatiin momenttijäykkä. (Inkerö 2014)



Kuva 45 Täyttökanavan silta S3, Ilmajoki (Laitinen 2014)

Kohteeseen asennettiin 4 kpl d711 mm teräsputkiporapaalua edellä kuvattua menetelmää käyttäen. Paalutuspöytäkirjojen mukaan jokaisen paalun pohjalle kulkeutui kivirouhetta, jota ei saatu puhdistettua huuhtelulla. Yksi paaluista jumiutui noin 1 m noston kohdalla. Paalu saatiin kuitenkin lopulta nostettua suunnitellulle tasolle. (Laitinen 2014)



*Kuva 46 Puhdistettu paalu, joka tarkistetaan terästangolla, jotta varmistutaan, ettei paalun pohjalla ole irtoaainesta ja täytetään tämän jälkeen puhtaalla vedellä. (Laitinen 2014)*

Menetelmän toteutettavuus voi olla riskialtista pitkillä paaluilla sekä paaluilla, jotka asennetaan tiiviiseen kitka- tai moreenimaahan, sillä paalun vaippavastus muodostuu näissä tapauksissa suureksi. Tällöin paalun ylösnosto voi olla hankalaa. Menetelmän käyttö lieenee mahdollista vain käytettäessä porakruunujärjestelmää, jossa avarinkruunu on irrallinen ja jää kallioreiän pohjalle tai siipiavarrinta käytettäessä. Muilla menetelmillä ylösvetovastus kasvaa helposti liian suureksi.

Menetelmässä paalua nostetaan tyypillisesti säteeltään 8–15 mm suuremmasta kallioreiästä ylös, joten pohjavedelle ja irtonaaiselle maa-ainekselle voi tulla reitti paalun ja kallioreiän välistä kallioreiän pohjalle. Kallioreikä voi olla hankala saada puhtaaksi betonointia ja raudoitusta varten. Kallioreiän puhdistamisen jälkeen puhdistaminen olisi todettava pumpaamalla kallioreikä tyhjäksi, tai jos kallioreikään vuotaa vettä runsaasti vähintään koetintangoilla tai ensisijaisesti vedenalaisella videokuvauksella (kuva 46).

Ennen betonointia paalu on täytettävä vedellä, jotta pohjavesi ei pääse valumaan putken ja kallioreiän väliä pitkin kallioreikään/paalun sisälle. Betonointi on tehtävä vedenalaisena valuna. Paalun puhdistuksen ja betonoinnin aikana paalua on tarpeen mukaan kannateltava (esim. maanpinnalle tehtävällä palkki-rakenteella), ettei paalu pääse liikkumaan. Menetelmässä paalun alapää tukeutuu betoniin, jonka laatu juuri paalun alapään alla voi olla muuta betonia heikompi johtuen yläpuolisesta kallioraosta mahdollisesti virtaavasta vedestä ja hienoaineksesta. Tästä johtuen rakenne on mitoitettava aksiaalisen kestävyys suhteen teräsbetonirakenteena tai teräsputkea hyödynnettäessä leimapaine paaluputken alla on rajoitettava suurimmillaan betonin puristuslujuuden mitoitusarvoon. Liittorakennevaikutusta voidaan hyödyntää paalun jäykkyydessä, momenttikestävyys ja vaakakestävyys. (Uotinen 2014)

## 4.6 Hanasaaren lämpökeskuksen piippu

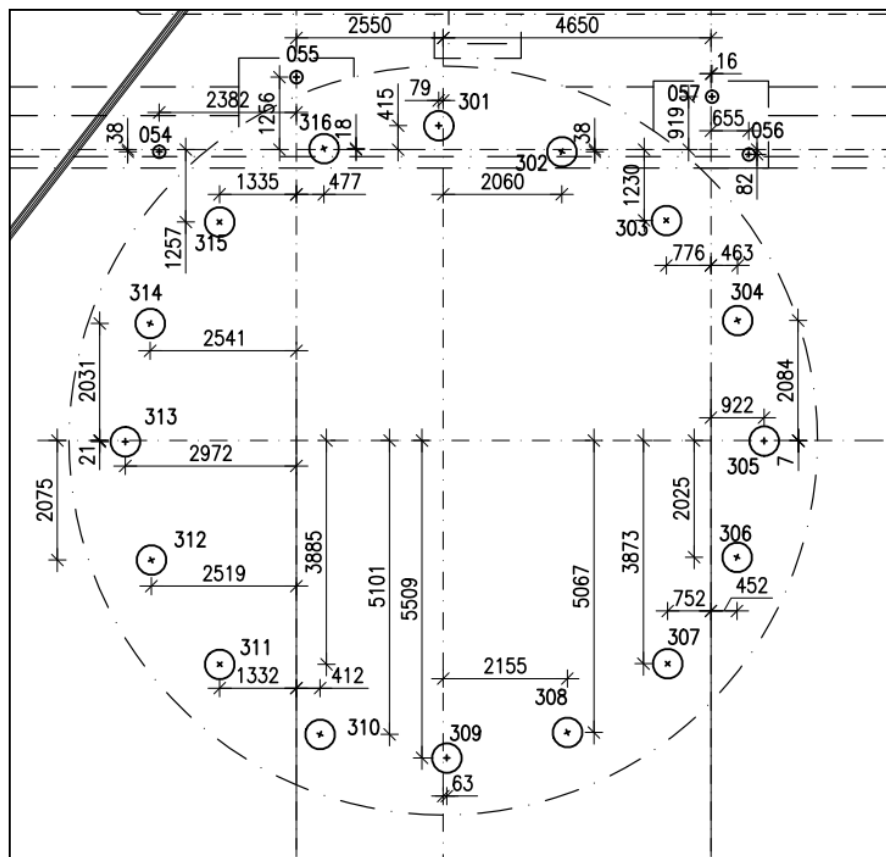
Helsingin Hanasaaren rakennettu lämpökeskus perustettiin paalujenvaraisesti. Lämpökeskuksen piippu perustettiin kallioon ankkuroitujen porapaalujen varaan.

### Pohjasuhteet

Maanpinta oli suunnittelualueella tasolla noin +2,3...+2,8. Maapeitteen paksuus vaihteli noin 27...30 m välillä. Täyttökerroksen paksuus vaihteli 5,5...10 m. Täyttö tehtiin karkeasta louheesta ja sisältää suuria kiviä ja lohkareita. Täytekerroksen alla oli 0...4 m paksu savi- ja silttikerros. Saven vesipitoisuus vaihteli 50...70 %, ja leikkauslujuus 15...30 kPa. Tämän kerroksen alla oli 7...15 m paksu hiekkakerros, joka sisälsi myös kiviä. Hiekkakerroksen alla oli tiivis ja lohkareinen moreenikerros. Moreenin paksuus oli 5...10 m. Kallionpinta vaihteli tasolla -27...-21.

### Paalut

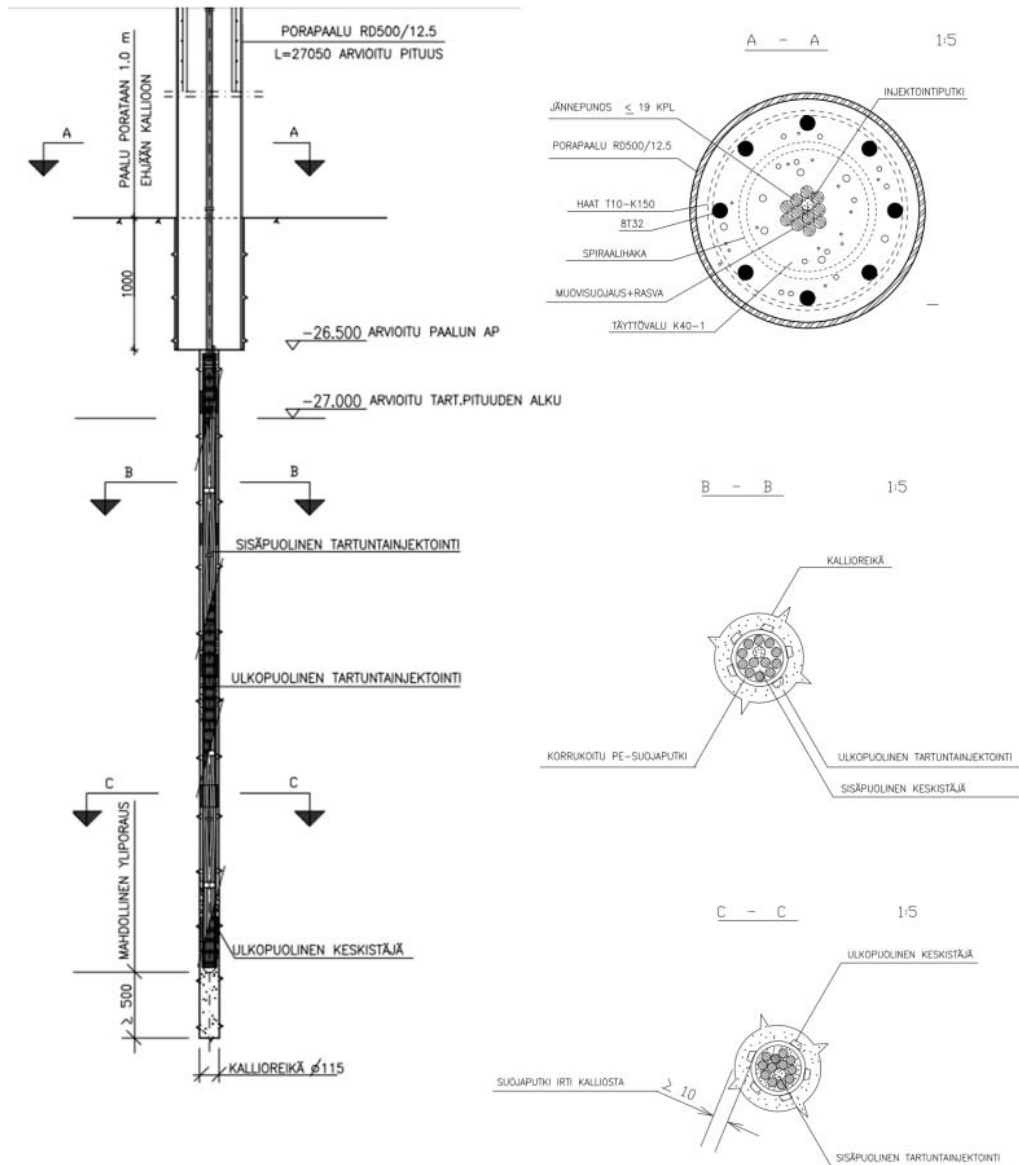
Piippu perustettiin RD500/12,5 porapaalujen varaan (kuva 47). Paaluja oli 16 kpl. Paalut porattiin 1 m ehjään kallioon.



Kuva 47 Paalutuspiirustus lämpökeskuksen piipusta.

### Ankkurit

Paalut ankkuroitiin 7-punoksisilla kallioankkureilla, St 1550/1770, d 15,7 mm (kuva 48). Ankkurit asennettiin d105mm kallioreikään. Ankkurin suojaputki asennettiin 0,5 m kallioon. Tartuntaosan pituus kalliossa oli vähintään 4,1 m. Ankkurit koevedettiin 1060 kN voimalla.



Kuva 48 Leikkauskuva ankkuroidusta porapaalusta.

## 4.7 Toimitilarakennus, Technopolis Ruoholahti

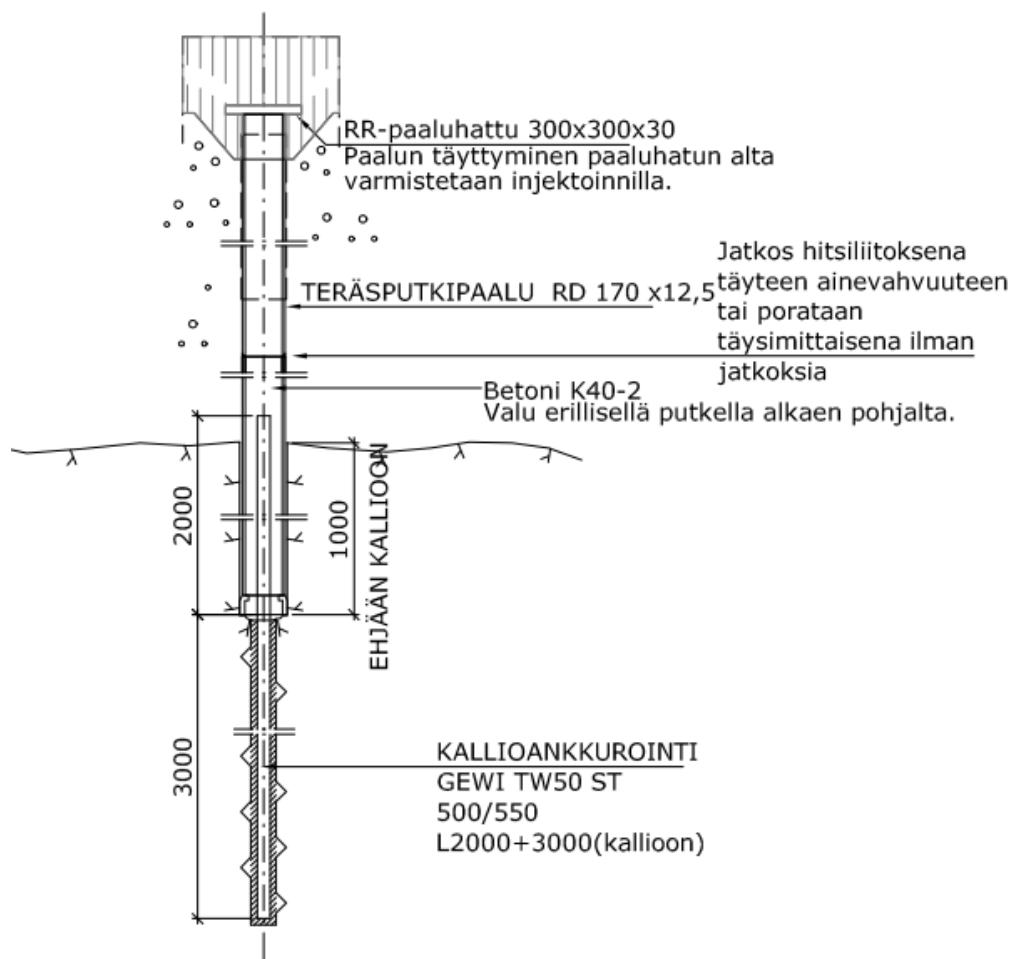
Technopolis Oy:n Helsingin Ruoholahteen rakennuttama toimitilarakennus perustettiin porapaalujen varaan. Paaluja oli yhteensä 466 kpl. Niistä 50 kpl ankkuroitiin kallioon.

### Pohjasuhteet

Maanpinta oli tontilla tasolla +1,8...+4,2. Pinnassa oli 2–4 m paksu täyttökerros. Ennen alueen täyttöä tehdyistä pohjatutkimuksista havaittiin, että maanpinta oli ollut tasolla noin +0. Savikerroksen paksuus oli 2–6 m. Tämän kerroksen alapuolella oli 0–5 m paksu moreenikerros. Kallionpinta vaihteli tasolla +1...–15. Täytön päältä tehdyistä tutkimuksista havaittiin, että täyttökerros oli painunut saveen ja osa kairauksista oli päättynyt täytteen sisältämiin kiviin. Porakonekairaustuloksista havaittiin, että saveen painuneessa täytteessä oli kiviä ja lohkareita vaihtelevasti koko savikerroksen osuudella.

### Paalut ja ankkurointi

Ankkuroidut paalut olivat RD170/12,5, RD220/12,5 ja RD 320/12,5. Paalut oli porattu vähintään 1 m kallioon. Paalut ankkuroitiin GEWI –tankoankkureilla, d 50 mm. Ankkurit asennettiin kallioon 3 m paalun alapään alapuolelle. Ankkurit ulotettiin 2 m paalun sisään (kuva 49).



Kuva 49

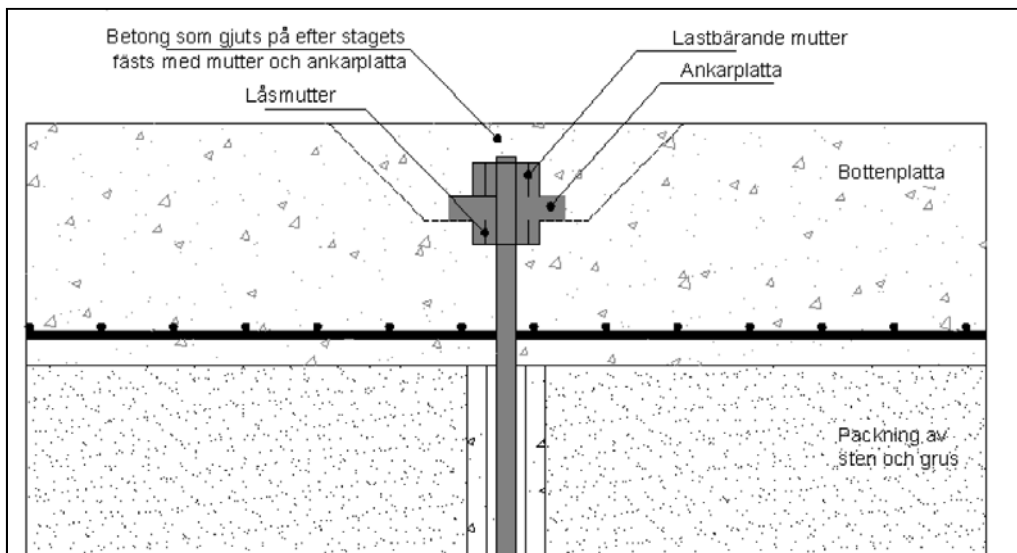
Leikkauskuva ankkuroidusta porapaalusta.

## 4.8 Ankkuroinnin liittyminen yläpuoliseen rakenteeseen

Alla on esitetty toteutustapoja tankoankkureiden, punosankkureiden, terässydänpaalun ja teräsputki-paalun liittämistä yläpuoliseen rakenteeseen.

### Ankkuritangot GWS, GEWI ja GEWI Plus

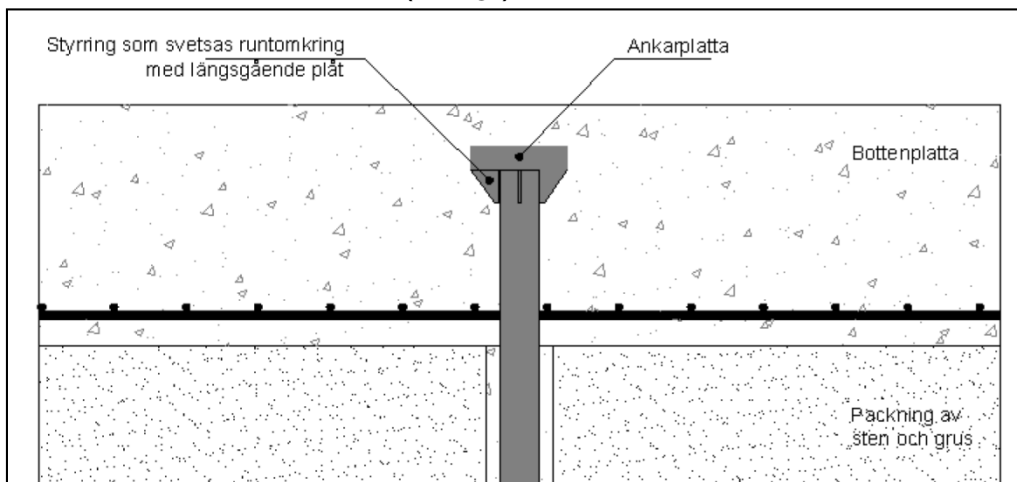
Kuvassa 50 on esitetty GEWI-tankoankkurin liittyminen pohjalaattaan. Tankoankkuri on valmistettu korkealujuuksisesta teräksestä. Ankkuri tuodaan puoliväliin laatan korkeussuunnassa. Ankkurin päähän asennetaan lukkomutteri ja tämän päälle ankkurilaatta. Ankkurilaatan päälle asennetaan kuormakantava mutteri. Ankkurointi valetaan umpeen. Lukkomutteriä ei käytetä GWS-ankkuritangon yhteydessä.



Kuva 50 GEWI-tankoankkurin liittyminen pohjalaattaan (Akfidan, Sadek 2012).

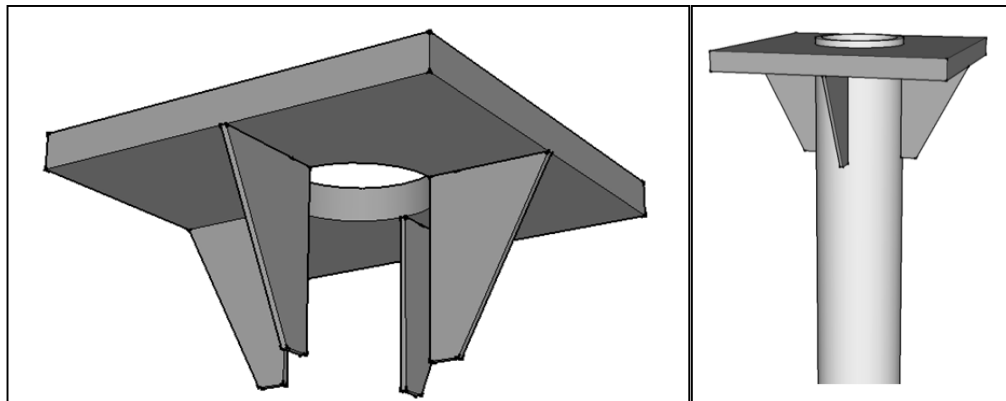
### Terässydänpaalu

Terässydänpaalun ankkurointi pohjalaattaan voidaan toteuttaa paalun yläpään hitsatun ankkurointilaatan avulla (kuva 51).



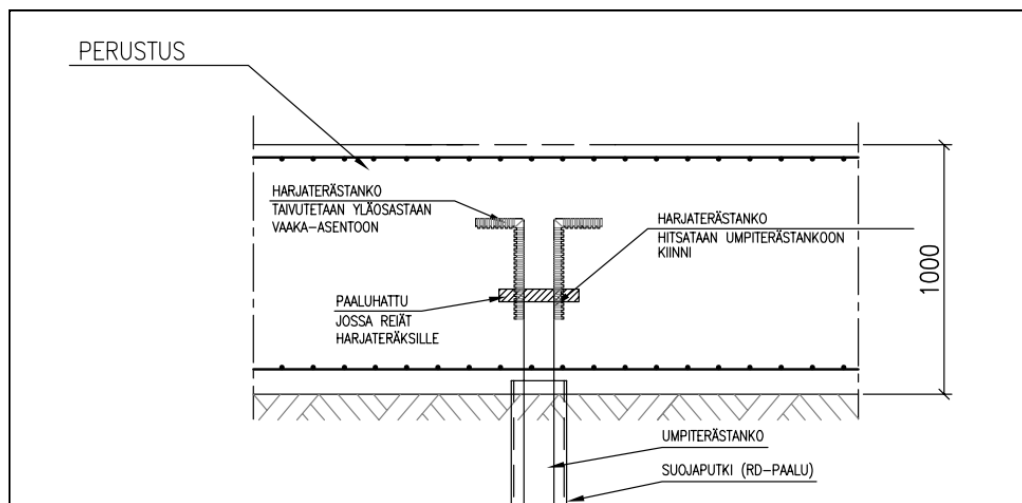
Kuva 51 Terässydänpaalun ankkurointi pohjalaattaan (Akfidan, Sadek 2012).

Kuvassa 52 on esitetty terässydänpaalun ankkurointiin tarkoitettu ankkurointilaatta. Laatan alapinnasta lähtevät teräslevyt liitetään paalun yläpäähän hitsaamalla.



Kuva 52 Terässydänpaalun tai teräsputkipaalun ankkurointiin soveltuva ankkurointilaatta (Akfidan, Sadek 2012).

Kuvassa 53 on esitetty terässydänpaalun ankkurointi perustusrakenteeseen. Harjaterästanko hitsataan paalun kylkiin kiinni ja taivutetaan yläosastaan vaaka-asentoon. Näin paalu saadaan ankkuroitua perustukseen.

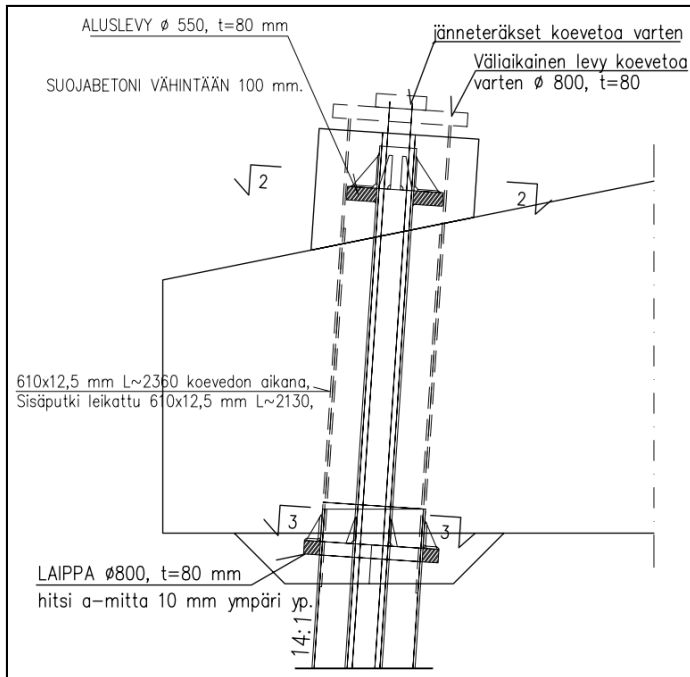


Kuva 53 Periaatekuva umpiterästangon ankkuroinnin toteuttamisesta perustusrakenteeseen (Vunneli 2014, muokattu).

### Teräsputkipaalu

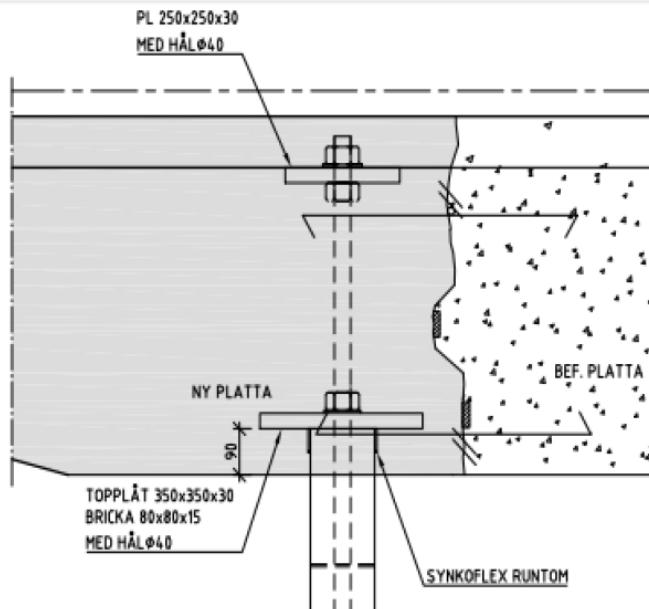
Teräsputkipaalun ja ankkuroinnin liittäminen anturaan voidaan toteuttaa alla esitetyn mukaisesti.

Kuvassa 54 teräsputkiporapaalun putkiankkuri on viety anturan läpi ja ankkuroitu anturan päälle. Ankkurointi valetaan umpeen ankkurien jännittämisen jälkeen.



Kuva 54 Kuvassa esitetyssä rakenteessa putkiankkuri on viety anturan läpi (Suunnitelmakokoelma Raabe).

Kuvan 55 mukaisessa ankkuroinnissa GWS-tankoankkuri on jätetty anturan sisään. Ankkurin yläpäähän on asennettu lukkomutteri.



Kuva 55 Kuvassa esitetyssä rakenteessa ankkurointi on jätetty laatan sisään (Akfidan, Sadek 2012).



## 4.9 Havaintoja toteutettujen kohteiden suunnitelmista

Vetokuormitusten suuruudessa oli suurta vaihtelua kohteiden välillä. Mitoitusvetokuormat vaihtelivat 200–2600 kN välillä. Kuorman suuruudesta riippumatta veto-voimat oli vastaanotettu järein ankkurointiratkaisuina. Technopoliksen kohteessa ankkurointiratkaisu poikkesi tosin muiden kohteiden rakenteesta, sillä ankkurointitankoa ei tuotu ylös anturaan saakka vaan se jätettiin 2 m kallionpinnan yläpuolelle paalun sisään.

Vain kahdessa tarkasteltujen kohteiden suunnitelmista oli esitetty kallioreiän halkaisijan koko. Kallioreiän, johon ankkuri asennetaan, on oltava riittävän suuri, jotta riittävä suojapeitepaksuus toteutuu. Vaadittu suojapeitepaksuus on 10 mm ankkurin tartuntaosuudella.

Ankkurin suojaputken poraussyvyys kallioon oli ohjeistettu myös vain kahdessa kohteessa. Ohjeistetut poraussyvytydet olivat 1 m ja 0,5 m. 0,5 m voidaan pitää minimivaatimuksena poraussyvytydelle. Suojaputken poraussyvyys tulisi ohjeistaa suunnitelmissa.

## 4.10 Vaihtoehtoiset ratkaisut

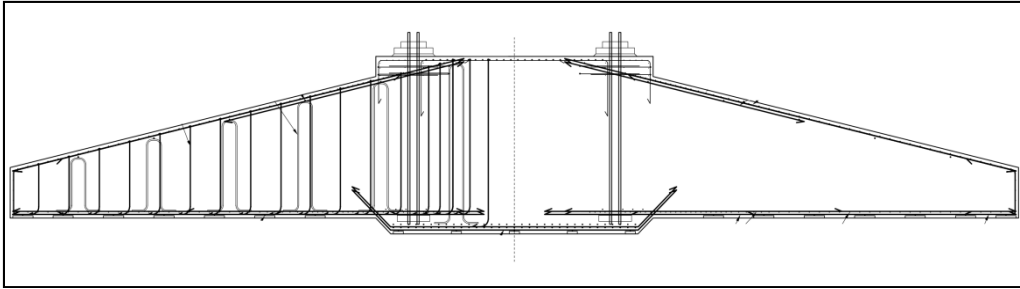
Vetojännityksille altistuvat perustukset toteutetaan joko kallioon ankkuroituna tai gravitaatioperustuksena. Vetojännitykset siirretään kallioon ankkuroiduissa perustuksissa joko pelkkien ankkureiden tai paalujen ja ankkureiden välityksellä. Pieniä vetojännityksiä voidaan vastaanottaa myös kitkapaalun vaipalla.

Perustustavan valintaan vaikuttavat mm. käytettävissä oleva tila, pohjasuhteet sekä kustannukset. Mikäli perustus tehdään rakennettuun ympäristöön, voi tilan puute rajoittaa usein kooltaan suuremman gravitaatioperustuksen käyttöä. Porapaaluperustuksen käyttö tulee usein kysymykseen myös, mikäli kohteessa on läpäistävänä lohkaretäyttyjä. Perustusanuran koko on porapaalutusperustusta käytettäessä usein tilavuudeltaan alle puolet gravitaatioperustuksen vaatimaan kokoon verrattuna. (Suunnitelmakokoelma Raahe)

### **Gravitaatioperustus**

Gravitaatioperustuksessa (kuva 56) perustuksen suuri massa sekä pohjapinta-ala toimivat vastapainona sekä momenttivartena. Maanvaraisen gravitaatioperustuksen käyttö edellyttää riittävän hyviä pohjaolosuhteita. (Pöyry 2010)

Etuna gravitaatioperustusta käytettäessä on perustuksen pienet liikkeet. (Rämö 2014)



Kuva 56 Periaatekuva tuulivoimalan gravitaatioperustuksesta. (Toni Rajamäki 2014)

### Gravitaatioperustus, paalutettu

Gravitaatioperustus voidaan toteuttaa myös paalutettuna, mikäli pohjaolosuhteet sitä vaativat. Tällöin perustuksen suuri massa sekä pohjapinta-ala varmistavat sen, ettei paaluille tule missään kuormitustilanteissa vetokuormitusta. Näin ollen paaluina voidaan käyttää vetojännityksiä kestävämpiä paalutyyppisiä kuten teräsbetonipaaluja.

## 5 Haastattelututkimus

Tämän tutkimustyön osana toteutettiin haastattelututkimus porapaaluja sekä kallio-ankkureita urakkakohteissaan käyttäville urakoitsijoille sekä porapaaluperustuksia suunnitteleville suunnittelukonsulteille.

### 5.1 Tutkimuksen toteutus

Haastattelututkimus lähetettiin 13 porapaalutukseen erikoistuneelle urakoitsijalle sekä 33 geo-/siltasuunnittelijalle sähköpostitse. Liikennevirasto osallistui haastattelukyselyn toteuttamiseen lähettämällä suunnittelijoille suunnatuista kyselyistä 20. Urakoitsijoille lähetetty kysely erosi osin suunnittelijoille lähetetystä kyselystä. Urakoitsijoille lähetetyssä kyselyssä pyrittiin hyödyntämään urakoitsijoiden käytännön tietoutta työmaalta, kun taas suunnittelijoille lähetetyssä kyselyssä keskityttiin ennemminkin mitoitusseikkoihin. Urakoitsijoilta vastauksia saatiin varsin kattavasti, lähes kaikilta Suomessa toimivilta porapaalutusurakoitsijoilta. Puolet vastauksista saatiin sähköpostitse ja reilu kolmannes puhelimitse. Muutama haastatteluista toteutettiin henkilökohtaisena haastatteluna. Vastausprosentti oli noin 75.

Suunnittelijoille suunnattu kysely lähetettiin myös kattavalle joukolle eri puolilla maata työskenteleviä suunnittelukonsultteja. Vastauksia saatiin 11 suunnittelijalta. Kokonaisuudessaan haastattelututkimuksella tavoitettiin kattava joukko porapaalutuksen kanssa työskenteleviä ammattilaisia.

### 5.2 Haastattelututkimuksen sisältö

Urakoitsijoille suunnatulla kyselyllä pyrittiin erityisesti selvittämään porapaalujen injektointiin liittyviä yksityiskohtia sekä kallioon ankkuroidun porapaalun toteutukseen liittyviä riskejä ja mahdollisia kehitysideoita.

Kysely sisälsi seuraavat kysymykset.

- Millaisissa kohteissa olette käyttäneet injektoituja/ankkuroituja porapaaluja?
- Onko työ sujunut ongelmitta?
- Oletteko injektointeet porapaalun vaipan ja kallion välistä tyhjätillaa? Millä injektointimenetelmällä ja injektointiaineella ja minkä suuruisella injektointipaineella työ on toteutettu?
- Mitkä ovat mielestänne pahimmat / suurimman riskin sisältävät vaiheet työn suorituksessa?
- Mitä kehitettävää näette ankkuroitujen porapaalujen käytössä?
- Mitä haluaisitte muuttaa yleisesti käytetyistä suunnitteluratkaisuista ankkuroitujen porapaalujen suhteen?
- Mitä mieltä olette vaipalta injektoitujen porapaalujen käytöstä ja toimivuudesta käytännössä?
- Mitä mieltä olette porapaalujen injektointimenetelmistä ja menetelmien toimivuudesta?
- Minkälaisia kokemuksia teillä on kallioankkureiden asennuksesta ja toimivuudesta?
- Ovatko injektoidut/ankkuroidut porapaalut mielestänne kustannustehokas ratkaisu?

Suunnittelijoille suunnatulla kyselyllä pyrittiin erityisesti selvittämään ankkuroitujen porapaalujen käyttökohteita, paaluille kohdistuvia kuormituksia sekä suunnittelua häiritseviä ongelmakohtia.

Kysely sisälsi seuraavat kysymykset.

- Millaisissa kohteissa olette käyttäneet injektoituja/ankkuroituja porapaaluja?
- Minkä suuruusluokan vetovoimia kohteissa on ollut?
- Ovatko vetorasitetut paalut koko ajan vedolla vai vain tietyissä kuormitustapauksissa?
- Pyrittekö suunnittelemaan paalun ja kallion välisen kontaktin momenttijäykäksi? (4xD + huuhtelu + injektointi)
- Onko kyseisten rakenteiden suunnittelussa / suunnittelun ohjeistuksessa parannettavaa tai ongelmakohtia?
- Valitsetteko ankkuroidun porapaalun suunnitteluratkaisuksi mielellään sen soveltuessa kohteeseen vai käytätkö mieluummin gravitaatioperustusta?
- Ovatko injektoidut/ankkuroidut porapaalut kustannustehokas ratkaisu?
- Onko käytössänne riittävästi lähtötietoja, jotta voitte käyttää ankkuroitua porapaalua suunnitteluratkaisuna?

## 5.3 Suunnittelijoiden vastauksia

### Käyttökohteet

Kohteita, joissa ankkuroituja porapaaluja on käytetty

- mastot ja tornimaiset rakenteet, kuten savupiiput ja tuulivoimalat
- rakenteet, joihin kohdistuu törmäyskuormia
- ratakohteet, joissa on suuria vaakavoimia ja pieni pysyvä kuorma
- rautatiesiltojen välituet, joissa paaluihin aiheutuu junan jarrukuormista veto-kuormia
- ranta-, laituri- ja siltarakenteet, joihin kohdistuu jääkuormia
- kellari- ja kaukalarakenteet, joiden mitoituksessa on otettava noste huomioon, kuten pumppaamot
- vesistö sillat
- dynaamisesti kuormitetut perustukset

### Tyypilliset kuormat

Kallioon ankkuroidulla porapaalulla vastaanotettavan vetovoiman suuruus on tyypillisesti 50–2000 kN paalua kohden. Pienetkin vetovoimat vastaanotetaan nykyisellään erillisen ankkurin välityksellä. Paaluihin kohdistuva vetokuormitus vaikuttaa vain tietyissä kuormitustapauksissa ja on useimmiten lyhytaikainen kuormitustilanne.

Paaluun kohdistuvan vaakakuorman suuruus vaihtelee 100–1500 kN.

### Momenttijäykkyys

Paalun ja kallion välinen kontakti voidaan Liikenneviraston ohjeistuksen (Liikenneviraston ohjeita 11/2012) mukaan suunnitella ja olettaa mitoituksessa momenttijäykäksi, kun

- poraussyvyys ehjään kallioon on 4 x ulkohalkaisija
- kallion ja paalun väli huuhdellaan puhtaaksi sekä injektoidaan sementtilaastilla

Paalun ja kallion välinen kontakti suunnitellaan momenttijäykäksi, jos vastaanotetaan ulkoisia vaakakuormia. Liitos suunnitellaan jäykäksi myös, kun halutaan minimoida perustuksen liikkeet vaakakuormituksessa. Liitos toteutetaan usein momenttijäykkänä, mikäli kallionpinta on lähellä maanpintaa, koska tällöin maakerroksen tuoma sivuvastus on pieni. Porapaaluseinissä paalun ja kallion välinen liitos useimmiten suunnitellaan momenttijäykäksi. Kun rakenteeseen kohdistuu pakkovoimia esim. lämpöliikkeistä, momenttijäykkää liitosta vältetään.

Suunnittelijoiden mukaan rakenteen käytännön toteutus on osin epäselvä. Urakoitsijat eivät pysty antamaan selkeää ratkaisua, kuinka injektointi toteutetaan luotettavasti. Erityisesti pohjavedenpinnan alapuolella tapahtuvaan injektointiin liittyy runsaasti epävarmuutta.

Käytännöt momenttijäykkyyden huomioimisesta mitoituksessa vaihtelevat. Osa suunnittelijoista hyödyntää momenttijäykkyyttä mitoituksessa, osa ei. Osa olettaa liitoksen olevan momenttijäykkä, kun poraussyvyys kalliossa on yli 1 m. Momenttijäykän kiinnityksen syntyminen injektoimalla tulisi pystyä varmistamaan nykyistä paremmin.

#### **Kustannustehokkuus**

Näkemykset rakenteen kustannustehokkuudesta vaihtelivat. Vastauksissa korostui, että rakenteen kustannustehokkuus on kovin riippuvainen käyttökohteesta. Rakenne on osoittautunut kustannustehokkaaksi suuren ratasillan vesistöuilla sekä laiturikohteissa.

#### **Lähtötiedot**

Useimpien vastausten perusteella lähtötietoja on riittävästi käytettävissä. Useammassa vastauksessa nousi esiin epävarmuus injektoinnin onnistumisesta sekä siitä, voidaanko paalun ja kallion välinen liitos olettaa suunnittelussa momenttijäykäksi.

Kokonaisuudessaan porapaaluihin liittyvää ohjeistusta pidettiin osin sekavana, sillä ohjeistusta löytyy useasta eri ohjeesta. Esille nousi ajatus, voisiko ohjeistuksen koota yhteen paikkaan, esim. RT-kortin tapaiseksi ohjeeksi.

## **5.4 Urakoitsijoiden vastauksia**

#### **Injektointimenetelmät**

Injektointimenetelminä on käytetty sekä painovoimaisia että paineellisia menetelmiä.

Painovoimainen injektointi on toteutettu täyttämällä paalu ensin injektointimassalla suunniteltuun tasoon saakka. Tämän jälkeen paalua nostetaan 1–2 m kallioreiässä ylöspäin ja lasketaan takaisin reiän pohjalle. Tämä nostelu toistetaan muutaman kerran, jotta injektointimassa leviää kallion ja paalun väliseen tyhjiin. Toinen tapa toteuttaa painovoimainen injektointi on täyttää paalu ensin injektointiaineella suunniteltuun tasoon. Tämän jälkeen injektointimassa leviää massan synnyttämän hydrostaattisen paineen avulla paaluputken kylkeen tehdyistä rei'istä.

Paineellinen injektointi on toteutettu kaksoismansetti-injektointina, jossa injektointiaine pumpataan kaksoismansettiin, josta se leviää paalun kylkeen tehtyjen reikien kautta paalun ja kallion väliseen tyhjätilaan. Paineellinen injektointi voidaan toteuttaa myös injektointiputkien kautta. Tällöin injektointiaine pumpataan injektointiputkien kautta paalun kylkeen tehtyihin reikiin, joista se leviää paalun ja kallion väliseen tyhjätilaan. Paineellinen injektointi toteutettiin Leo-Ville Miettisen diplomityön yhteydessä toteutetulla koekohteella injektointirenkaan avulla. Menetelmässä injektointimassa pumpataan paalun ulkopintaan hitsattujen injektointiputkien kautta injektointirenkaaseen, josta se leviää paalun ja kallion väliseen tyhjätilaan.

### **Riskit ja niiden välttäminen**

Urakoitsijoita arvelutti vetokuormien vastaanottaminen ainoastaan vaipalta ankkuroinnin varaan. Urakoitsijoiden näkemyksissä korostui riski injektoinnin epäonnistumisesta. Erityisesti urakoitsijoita arvelutti, miten kallion ja paalun välinen tyhjätila saadaan puhdistettua ja kuinka tämä voidaan varmistaa. Esiin nousi ajatus, olisiko tyhjätila helpompi puhdistaa, jos se olisi suurempi. Suurempi tyhjätila saataisiin aikaan ylikoon avarrinkruunua käyttäen.

Keinoina injektoinnin onnistumisen varmistamiseksi nähtiin paalujen koekuormitus sekä työvaiheen tarkka valvonta. Erityistä huomiota tulee kiinnittää massamenekkiin, injektointipaineeseen sekä työsuoritukseen kokonaisuudessaan.

Momenttijäykän kontaktin aikaansaamiseksi injektointi nähtiin toimivaksi ratkaisuksi. Muutamissa kohteissa momenttijäykkäliitos on toteutettu poraamalla kallioreikä vain hieman paaluputkea suuremmalla avarrinkruunulla, jolloin liitos on voitu olettaa momenttijäyäksi.

### **Työn suoritus**

Sopivana injektointipaineena pidetään 5–10 bar. Injektointiaineena tulee käyttää vesi-sementti-seosta. Vesi-sementti-suhteen tulee olla mahdollisimman pieni. Lisäksi tarvittaessa joukossa voidaan käyttää notkistimia sekä sementtinä korkealujuus-sementtiä. Juotosbetonilla injektointi ei onnistu, joten sitä ei tule sallia injektointiaineeksi.

## 6 Kustannustarkastelu

Tässä luvussa on esitetty kustannusvertailu kallioon vaipaltaan injektoidun ja ankkuroidun teräspuikiporapaalun sekä tankoankkurilla ankkuroidun porapaalun välillä. Vaipaltaan injektoidun porapaalun kustannuslaskennan lähtötiedot perustuvat osin tämän tutkimuksen yhteydessä toteutetun pilottikohteen kustannuksiin sekä osin Infrarakentamisen kustannustieto-ohjelmisto Foren tietoihin. Tankoankkurilla ankkuroidun porapaalun kustannustiedot perustuvat Fore-tiedon lisäksi luvussa 4 esitellyjen Norrskatan lauttapaikan sekä Sirkkalan sillan kustannusarvioihin.

### 6.1 Lähtötiedot

Taulukossa 11 on esitetty porapaalutuksen yksikköhinta. Porapaalutuksen kokonais-hinta muodostuu yksikköhinnan ja poraussyvyiden tulona.

Taulukko 11 Porapaalutuksen yksikköhinnat.

Porapaalutus	
Paalukoko	Yksikköhinta [€/m]
RD220	170
RD500	580
RD800	990

Poraussyvyys muodostuu maakerrososuuden ja kallio-osuuden summasta.

- Vaipaltaan injektoitu porapaalu
  - Kallio-osuus:  $3 \times D$ , kuitenkin vähintään 2 m
  - Maakerrososuus: Maapeitteen paksuus
- Ankkuroitu porapaalu
  - Kallio-osuus:  $3 \times D$ , kuitenkin enintään 1,5 m
  - Maakerrososuus: Maapeitteen paksuus

Taulukossa 12 on esitetty ankkuroinnin yksikköhinnan muodostuminen.

Taulukko 12 Ankkuroinnin yksikköhinnan muodostuminen.

Ankkurointi, GEWI d40, 4 m kallioon		
Kallio-osuus		
Poraus, kallioreikä	250	€/kpl
Materiaali	120	
Injektointi + vesimenekkikoe	400	
Yläpään rakenteet + koestus	400	
Yhteensä	1170 e/kpl → 1200 e/kpl	
Maakerrososuus		
Pituus	X	m
Paino	11,51	kg/m
Hinta	2,5	€/kg
Yhteensä	28.8	€/m

Mitoitusvetokuorma on 300 kN, joten laskennassa on käytetty oletusta, että ankkuri asennetaan 4 m kallioon paalun alapinnasta lukien.

Taulukossa 13 on esitetty injektoinnin yksikköhinnan muodostuminen.

Taulukko 13 Injektoinnin yksikköhinnan muodostuminen.

Injektointikustannus / paalu			
Paalukoko	Työ (sis. työ+ kaluston mobilisaatio)	Massa	Kustannus
RD220	$145 \text{ e/h} \times 1,3\text{h} + 57 \text{ e} \approx 250 \text{ €}$	$1,2 \text{ e/l} \times 160 \text{ l} = 190 \text{ €}$	$\approx 450 \text{ €}$
RD500	$145 \text{ e/h} \times 1,3\text{h} + 57 \text{ e} \approx 250 \text{ €}$	$1,2 \text{ e/l} \times 200 \text{ l} = 240 \text{ €}$	$\approx 500 \text{ €}$
RD800	$145 \text{ e/h} \times 1,3\text{h} + 57 \text{ e} \approx 250 \text{ €}$	$1,2 \text{ e/l} \times 300 \text{ l} = 360 \text{ €}$	$\approx 600 \text{ €}$

## 6.2 Kustannusvertailu

Kustannusvertailu tehtiin 3 eri paalukoon sekä 3 eri maapeitteen paksuuden välillä. Paalukoot olivat RD220, RD500 ja RD800. Maapeitteen paksuudet olivat 6 m, 15 m ja 30 m. Taulukoissa 14, 15 ja 16 on tehty kustannusvertailu vaipaltaan injektoidun ja ankkuroidun porapaalun välillä.

Taulukko 14 RD220-kustannusvertailu.

Paalukoko RD 220		
Maapeitteen paksuus 6 m		
Vaipaltaan injektoitu porapaalu		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
1360	450	1810
Ankkuroitu porapaalu		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
1132	1392	2524
Kustannusero menetelmien välillä		714 €
Maapeitteen paksuus 15 m		
Vaipaltaan injektoitu porapaalu		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
2890	450	3340
Ankkuroitu porapaalu		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
2662	1651	4313
Kustannusero menetelmien välillä		973 €
Maapeitteen paksuus 30 m		
Vaipaltaan injektoitu porapaalu		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
5440	450	5890
Ankkuroitu porapaalu		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
5212	2082	7294
Kustannusero menetelmien välillä		1404 €



Taulukko 15 RD500 – kustannusvertailu.

<b>Paalukoko RD 500</b>		
<u>Maapeitteen paksuus 6 m</u>		
<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
4640	500	5140
<b>Ankkuroitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
4350	1416	5766
<b>Kustannusero menetelmien välillä</b>		<b>626 €</b>
<u>Maapeitteen paksuus 15 m</u>		
<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
9860	500	10360
<b>Ankkuroitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
9570	1675	11245
<b>Kustannusero menetelmien välillä</b>		<b>885 €</b>
<u>Maapeitteen paksuus 30 m</u>		
<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
18560	500	19060
<b>Ankkuroitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
18270	2106	20376
<b>Kustannusero menetelmien välillä</b>		<b>1316 €</b>

Taulukko 16 RD800 – kustannusvertailu.

<b>Paalukoko RD 800</b>		
<u>Maapeitteen paksuus 6 m</u>		
<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
8316	600	8916
<b>Ankkuroitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
7425	1416	8841
<b>Kustannusero menetelmien välillä</b>		<b>- 75 €</b>
<u>Maapeitteen paksuus 15 m</u>		
<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
17226	600	17826

<b>Ankkuroitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
16335	1675	18010
<b>Kustannusero menetelmien välillä</b>		<b>184 €</b>
<b>Maapeitteen paksuus 30 m</b>		
<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Injektointi [€]	Yhteensä [€]
32076	600	32676
<b>Ankkuroitu porapaalu</b>		
Poraus [€]	Ankkurointi [€]	Yhteensä [€]
31185	2106	33291
<b>Kustannusero menetelmien välillä</b>		<b>615 €</b>

Taulukkoon 17 on koottu yhteenveto taulukoiden 14, 15 ja 16 tuloksista.

*Taulukko 17 Yhteenveto kustannusvertailun tuloksista.*

<b>Paalukoko / Maapeitteen paksuus</b>	<b>Kustannukset [€]</b>		<b>Kustannusten erotus [€ / %]</b>
	<b>Vaipaltaan injektoitu porapaalu</b>	<b>Ankkuroitu porapaalu</b>	
RD220 / 6m	1810	2524	714 / 28 %
RD220 / 15m	3340	4313	973 / 22 %
RD220 / 30m	5890	7294	1404 / 19 %
RD500 / 6m	5140	5766	626 / 11 %
RD500 / 15m	10360	11245	885 / 8 %
RD500 / 30m	19060	20376	1316 / 6 %
RD800 / 6m	8916	8841	-75 / -0,8 %
RD800 / 15m	17826	18010	184 / 1 %
RD800 / 30m	32676	33291	615 / 2 %

Kustannustarkastelun perusteella vaipaltaan injektoitu porapaalu osoittautuu kustannustehokkaaksi ratkaisuksi. Tarkastelun mukaan menetelmä on kustannuksiltaan edullisempi 8 tarkastelussa 9:stä.

Kustannustarkastelussa vertailtiin 3 eri paalukokoa (RD220, RD500, RD800). Pienimmän tarkastellun paalukoon RD220 kohdalla injektoitu porapaalu osoittautui noin 25 % ankkuroitua porapaalua edullisemmaksi. RD500 kohdalla eroa oli noin 10 % injektoidun porapaalun hyväksi. RD800 kohdalla menetelmät osoittautuivat kustannuksiltaan liki samansuuruisiksi.

Kustannustarkastelussa vertailtiin myös maapeitteen paksuuden vaikutusta menetelmien kustannuseroihin. Kaikkien tarkasteltujen paalukokojen kohdalla vaipaltaan injektoidun porapaalun kustannustehokkuus parani poraussyvyiden kasvaessa. RD220 ja RD500 kohdalla suhteellinen ero kuitenkin pieneni poraussyvyiden kasvaessa.

## 7 Laskennalliset tarkastelut

### 7.1 Vetokestävyys

#### 7.1.1 Porapaalut

Nykyisen ohjeistuksen mukaan vetopaaluja mitoitettaessa on tarkastettava, että kallion ja paalun välinen vaippavastus sekä kalliokartion paino ovat riittävät. Vaippavastuksen määrittämiseksi on tarkastettava sekä kallioreiän ja juotoslaastin että juotoslaastin ja teräksen välinen tartunta. Tässä luvussa tehdyt tarkastelut on tehty luvun 3.2.2 mukaisesti.

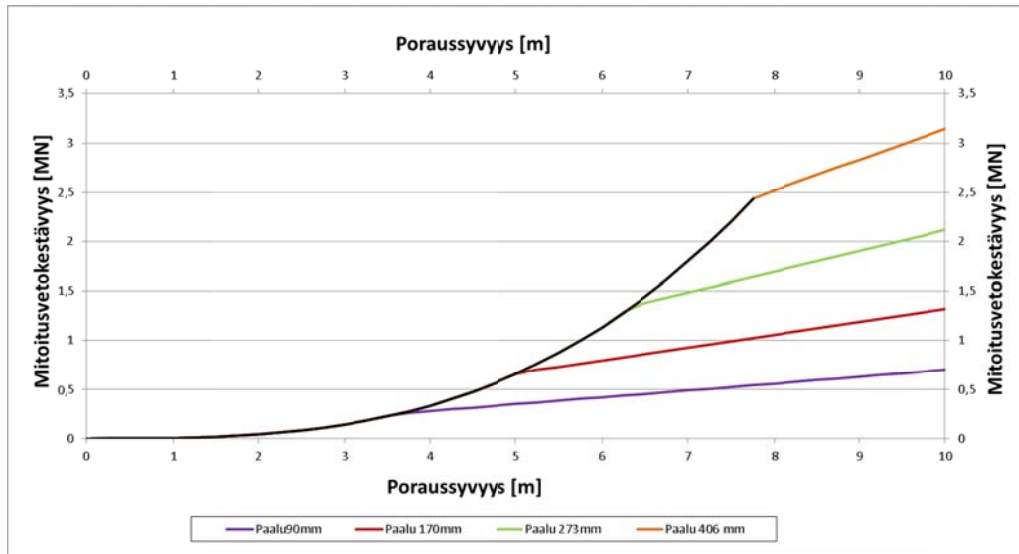
Laskelmissa on käytetty

- kallio-laasti-juotoksen ominaistartuntalujuutena 0,7 MPa
- teräs-laasti-juotoksen ominaistartuntalujuutena 1,2 MPa
- kalliokartion kärkikulma 60° (rikkonainen kallio)
- kalliokartion kärkikulma 90° (ehjä kallio)
- osavarmuuslukuna 1,35
- mallikertoimenä 1,5

On huomioitava, että mikäli käytetään mekaanisia paalujatkoksia, vetokestävyys rajoittuu 15 % paalun puristuskestävyydestä. Tosin käytettäessä SSAB:n kierreholkkijatkoksia saavutetaan vähintään 50 % paaluputken vetokestävyydestä (SSAB:n teräspaalut; Suunnittelu- ja asennusohjeet). Käytännössä mikäli paalun vetokestävyyttä halutaan hyödyntää mitoituksessa, tulee paalut jatkaa kierreholkkijatkoksilla tai hitsaamalla. Hitsattujen jatkosten kestävyys tulee varmistaa NDT-tarkastuksilla (RIL-254-1-2011).

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty laskennallinen vetokestävyys poraussyvyyden funktiona. Kuvaajassa musta viiva kuvaa kalliokartion painoa ja muut viivat eri paalukokojen vaipan geoteknistä kestävyyttä. Kalliokartion paino ei ole riippuvainen paalun halkaisijasta, mutta vaipan geotekninen kestävyys kasvaa paalukoon kasvaessa.

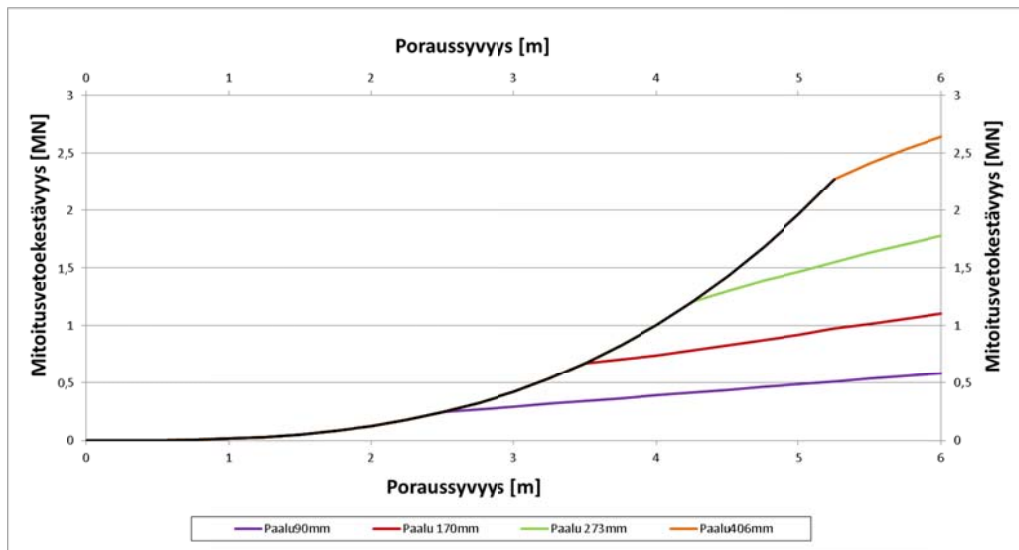
### Rikkonainen kallio



Kuva 57 Paalun mitoitusvetokestävyys rikkonaisessa kalliossa (kalliokartion kärkikulma  $60^\circ$ ).

Kalliokartion paino rajoittaa pienpaalujen vetokestävyyttä rikkonaisessa kalliossa paalun koosta riippuen 3,5–7,5 m poraussyvyyteen saakka. Tästä eteenpäin mitoittavana tekijänä on kallio-laasti-juotoksen kestävyys.

### Homogeeninen kallio



Kuva 58 Paalun mitoitusvetokestävyys homogeenisessä kalliossa (kalliokartion kärkikulma  $90^\circ$ ).

Kalliokartion paino rajoittaa pienpaalujen vetokestävyyttä ehjässä, homogeenisessa kalliossa paalun koosta riippuen 2,5–5 m poraussyvyyteen saakka. Tästä eteenpäin mitoittavana tekijänä on kallio-laasti-juotoksen kestävyys.

### 7.1.2 Kallioankkurit

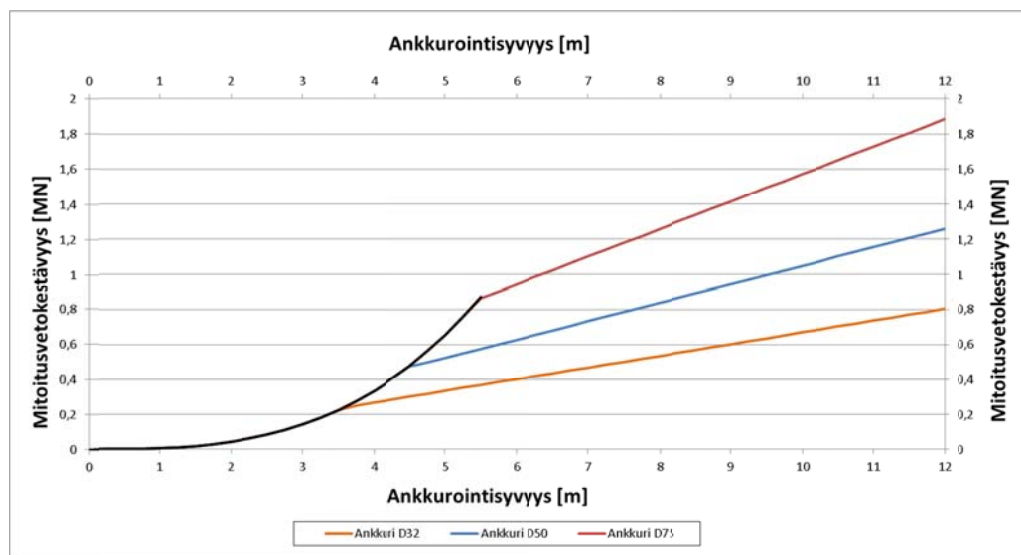
Kallioankkurin kalliojuotoksen mitoituksessa tulee huomioida sekä kalliojuotoksen riittävä pituus että kalliokartion riittävä paino. Tässä luvussa tehdyt tarkastelut on tehty luvun 3.3 mukaisesti.

Laskelmissa on käytetty

- kallio-laasti-juotoksen tartuntalujuuden mitoitusarvona 1,0 MPa
- teräs-laasti-juotoksen ominaistartuntalujuutena 1,5 MPa
- kalliokartion kärkikulmana 60°
- osavarmuutena 1,5

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty vetokestävyys poraussyvyyden funktiona. Kuvaajassa musta viiva kuvaa kalliokartion painoa ja muut viivat eri ankkurikokojen vaipan geoteknistä kestävyyttä. Kalliokartion paino ei ole riippuvainen ankkurin halkaisijasta, mutta vaipan geotekninen kestävyys kasvaa ankkurin koon kasvaessa.

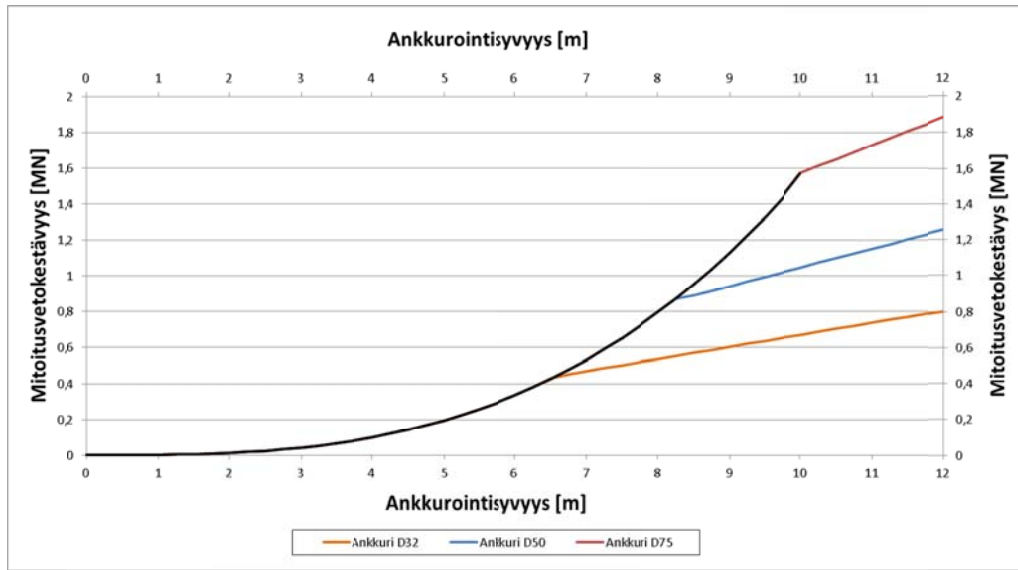
#### Kalliokartio huomioitu ankkurin alapäästä lähtien



Kuva 59 Kallioankkurin vetokestävyiden mitoitusarvo ankkurointisyvyyden funktiona.

Kuvan 59 mukaan kalliokartion paino rajoittaa kallioankkurin vetokestävyttä ankkurin koosta riippuen 3,5–5,5 m ankkurointisyvyyteen saakka, kun kalliokartio huomioidaan ankkurin alapään tasosta lähtien.

### Kalliokartio huomioitu 1/3 ankkurin alapäästä lähtien

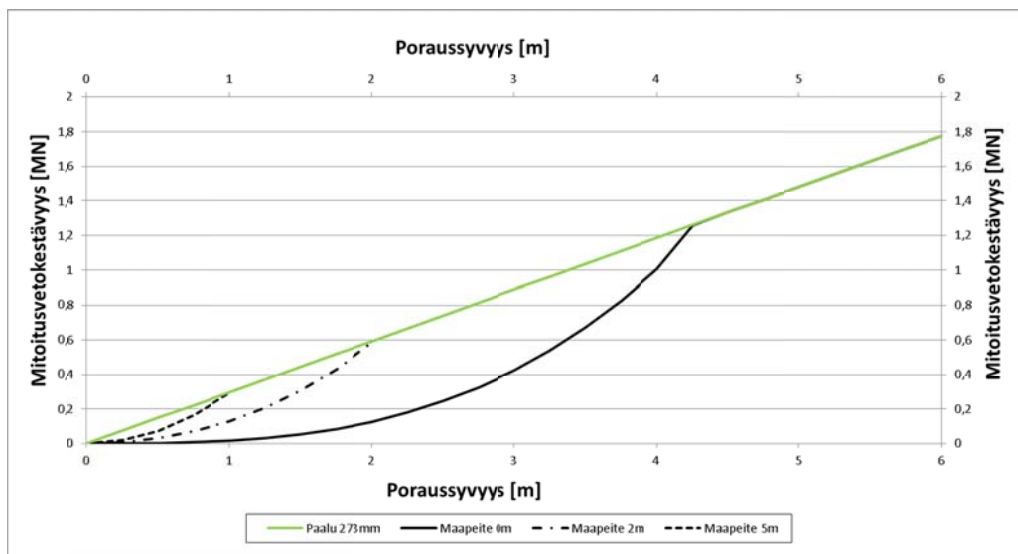


Kuva 60 Kallioankkurin vetokestävyyden mitoitusarvo ankkurointisyvyyden funktiona.

Kuvan 60 mukaan kalliokartion paino rajoittaa kallioankkurin vetokestävyyttä ankkurin koosta riippuen 6,5–10 m ankkurointisyvyyteen saakka, kun kalliokartio huomioidaan 1/3 ankkurointitason yläpuolelta lähtien.

#### 7.1.3 Maapeitteen paksuuden vaikutus kalliokartion painoon

Kuvassa 61 on esitetty maapeitteen tuoma lisäkuorma kalliokartion painoon. Kuvassa on esitetty kalliokartion paino mustalla viivalla ja paalun ja kallion välinen vaippavasutus vihreällä viivalla. Kalliokartion painot on esitetty ilman maapeitettä sekä 2 m ja 5 m paksuilla maapeitteillä. Kalliokartion kärki on oletettu tarkastelussa paalun alapinnan tasoon.



Kuva 61 RD273-paalun mitoitusvetokestävyyden sekä kalliokartion painot.

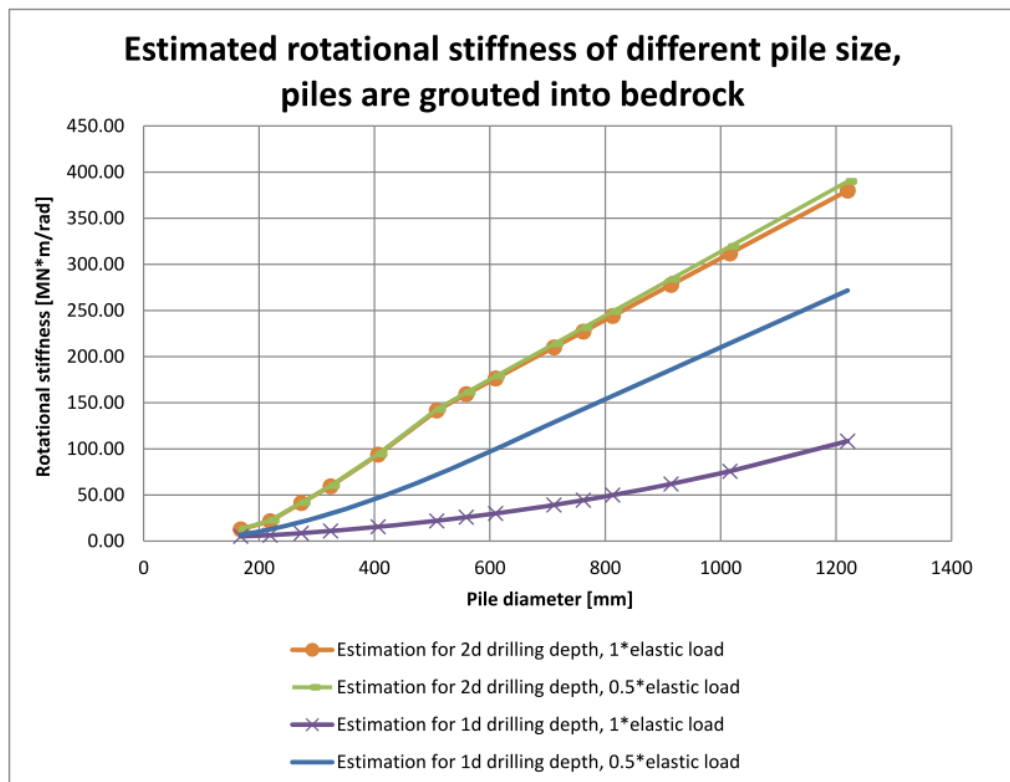
Kalliokartion paino rajoittaa RD273-paalun vetokestävyyttä noin 4 m poraussyvyyteen saakka. 2 m paksulla maapeitteellä kalliokartion paino rajoittaa vetokestävyyttä 2 m poraussyvyyteen saakka ja 5 m paksulla maapeitteellä 1 m poraussyvyyteen saakka. Ohutkin maapeitteen paksuus lisää siis kalliokartion painoa huomattavasti.

## 7.2 Momenttijäykkyys

Kun porapaalu injektoidaan vaipaltaan kallioon, parannetaan paalun vetokestävyyden lisäksi myös paalun kiertojäykkyyttä. Kiertojäykkyydestä on hyötyä eritoten lyhyillä paaluilla, joihin kohdistuu vaakakuormia sekä RD-porapaaluseinässä, kun seinän ja kallion välinen kontakti saadaan momenttijäykäksi. Alla on esitetty lyhyesti kiertojäykkyydestä aiemmin tehtyjen tutkimusten tuloksia ja havaintoja.

### Aiemmat tutkimukset

Leo-Ville Miettisen diplomityössä (2014) tutkittiin porapaalujen kiertojäykkyyttä. Työssä tehtiin FEM-laskentaa sekä kenttäkokeita kiertojäykkyyden määrittämiseksi. Näiden tarkasteltujen perusteella injektoidun porapaalun ja kallion välinen kontakti voidaan olettaa momenttijäykäksi, kun poraussyvyys ehjään kallioon on 2 x paalun ulkohalkaisija. Laskennallisten tarkastelujen sekä kenttäkokeiden perusteella kiertojäykkyys ei kasva porattaessa tätä syvemmälle.



Kuva 62 Paalun kiertojäykkyys eri poraussyvyyksillä.

FEM-laskentojen tulokset ja kenttäkokeiden tulokset olivat lähes samat tapauksissa, joissa paaluputken ja kallion välinen rako oli injektoitu tai täytynyt tiiviisti pakkautuneesta porasojasta. Miettisen diplomityössä esitettiin lisätutkimustarve sille, että kiertojäykkyys voitaisiin määrittää myös yksinkertaisilla yhtälöillä.

## 8 Koekohde Ylivieskassa

Osana tätä tutkimusta toteutettiin koekohde, jossa koekuormitettiin 15 kpl kallioon injektoimalla ankkuroituja teräsputkiporapaaluja. Paalujen ulkohalkaisija on 273 mm ja seinämävahvuus 12,5 mm.

### 8.1 Kohteen esittely

#### 8.1.1 Sijainti

Koekohde sijaitsee Ylivieskassa Salmiperäntien varressa. Koekohde sijoittuu Seinäjoki–Oulu-rataosalle, ratakilometrille 627+840 Salmelan tasoristeyksen läheisyyteen (kuva 63). Salmelan tasoristeys poistuu käytöstä ensi vuonna, kun se korvataan alikulkukäytävällä Seinäjoki–Oulu-ratahankkeen yhteydessä.



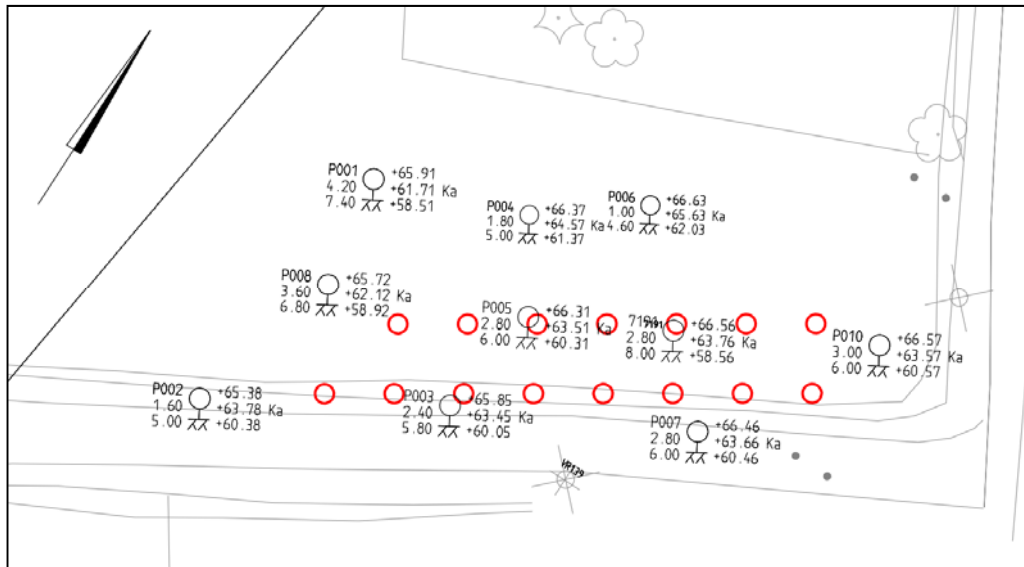
Kuva 63 Koekohde sijaitsee radan varressa lähellä Ylivieskan liikennepaikkaa.

#### 8.1.2 Pohjatutkimukset

Kohde valikoitui Salmelan tasoristeyksen läheisyyteen, sillä alikulkukäytävän suunnittelua varten kohteessa oli tehty pohjatutkimuksia. Tutkimusten perusteella kalliopinnan korkeusasema vaikutti sopivalta koestusta varten. Maakerrosten paksuus oli noin 3 m.

Kalliopinnan korkeusaseman sekä kallion rikkonaisuuden selvittämiseksi koekohteella tehtiin lisäksi 10 uutta porakonekairaus (kuva 64). Näiden lisätutkimusten perusteella määritettiin koekentän tarkka sijainti.





Kuva 64 Tehdyt pohjatutkimukset sekä paalujen sijainti. Paalut on esitetty kuvassa punaisella.

### 8.1.3 Pohjaolosuhteet

Maanpinnan korkeus on tasolla +65,5...+66,5. Pintamaan alapuolella on 2,5...4 m paksu silttimoreenikerros. Kalliopinta on tasolla +62,2...+63,8.

Porakonekairausten perusteella kallio on pääosin ehjää. Muutaman porakonekairauksen kohdalla kallio on pinnasta noin 1...1,5 m syvyyteen saakka osin rikkonaista. Lisäksi muutaman porakonekairauksen perusteella kalliossa oli havaittavissa kovan pintaosan alla noin 1...2 m syvyydessä noin 1 m paksu rikkonainen kerros.

Tehdyn koekuopan ja koekuoppaan suotautuneen vesimäärän perusteella vallitseva pohjavedenpinta on noin kallionpinnan tasossa.

### Kivilaji

Geologi määritteli koekohteelta otetun kivilajinäytteen perusteella pääkivilajiksi gabron. Gabron päämineraalit ovat plagioklaasi, sarvivälke sekä pyrokseeni, ja se on värittään mustaa tai tummanharmaata (kuva 65). Gabron puristuslujuus on tyypillisesti 260–350 MPa, joka vastaa hyvälaatuista kiveä. Alueella on kallioperäkartan perusteella myös graniittia, johon porauksen yhteydessä maanpinnalle noussut punertava porasoija viittaa. (Sunell 2015; Patrikainen 1983)



Kuva 65 Kallioperän kivilaji on pääasiassa gabroa.

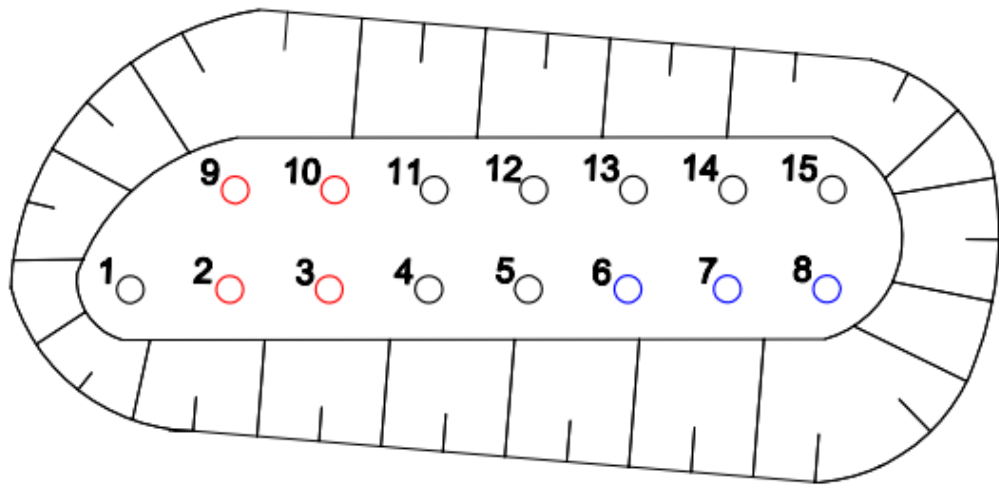
## 8.2 Työn suoritus

Koejärjestelyt koostuivat paalujen poraamisesta, paalujen injektoinnista, kaivannon kaivusta, koestusrakenteiden teosta sekä paalujen vetokokeista.

### 8.2.1 Paalujen poraus

#### Paalut

Koekenttä koostui RD273/12,5-teräsputki-porapaaluista. Paaluja oli 15 kpl, ja ne sijoitettiin kahteen riviin. Paalujen välinen etäisyys toisistaan oli 4 m. Kunkin paalun pituus oli 6 m. Kuvassa 66 on esitetty punaisella 1,0 m kallioon porattavat paalut, mustalla 1,8 m kallioon porattavat paalut ja sinisellä 2,0 m kallioon porattavat paalut. Kuvassa on lisäksi esitetty kaivannon laajuus sekä kaivuluiskat.



Kuva 66 Paalujen sijainti.

### Poraussyvyys

Paalut porattiin maakerrosten läpi kallionpintaan ja edelleen kallioon. 4 kpl paaluista suunniteltiin porattavan 1,0 m syvyyteen kallioon, 8 kpl 1,8 m syvyyteen ja 3 kpl 2,0 m syvyyteen. Toteutuneet poraussyvytydet poikkesivat hieman suunnitelluista, ja ne on esitetty alla taulukossa 18.

Porauspituuksia valittaessa tartuntalujuudet injektointiaineen ja paaluputken sekä injektointiaineen ja kallion välillä arvioitiin Paalutusohjeen (2011) mukaan. Näin ollen kuormituslaitteiston kapasiteetti huomioiden porauspituuksiksi valittiin maksimissaan 2 m, jotta paalut oletettavasti saataisiin vedetyksi irti kalliosta.

Taulukko 18 Suunnitellut poraussyvytydet, toteutuneet poraussyvytydet sekä näiden erotus.

Paalu nro	Suunniteltu poraussyvyys [m]	Toteutunut poraussyvyys [m]	Erotus [m]
1	1,8	2,2	+ 0,4
2	1	1,3	+ 0,3
3	1	1,1	+ 0,1
4	1,8	1,9	+ 0,1
5	1,8	2,1	+ 0,3
6	2	2,1	+ 0,1
7	2	2,2	+ 0,2
8	2	2,4	+ 0,4
9	1	1	0
10	1	1	0
11	1,8	1,75	- 0,05
12	1,8	1,75	- 0,05
13	1,8	1,9	+ 0,1
14	1,8	2,5	+ 0,7
15	1,8	2,2	+ 0,4

### Porausmenetelmä

Porapaalutustyö tehtiin keskisellä porausmenetelmällä. Poraustyössä käytettiin uppoporauskalustoa.

### Poraussuoritus

Paalut porattiin suunniteltuun syvyyteen. Porauksen jälkeen paalu huuhdeltiin ensin paineilmalla. Tämän jälkeen paalu täytettiin vedellä noin puoliväliin paalua, ja sitten puhallettiin paineilmaa uudelleen paaluun. Näin vesi huuhtoi paalua ja todennäköisesti osin paaluputken ja kallioreiän välistä rakoa. Lopuksi tehtiin loppulyönnit, joilla varmistettiin että paalun alaosa on kiinni kalliossa.

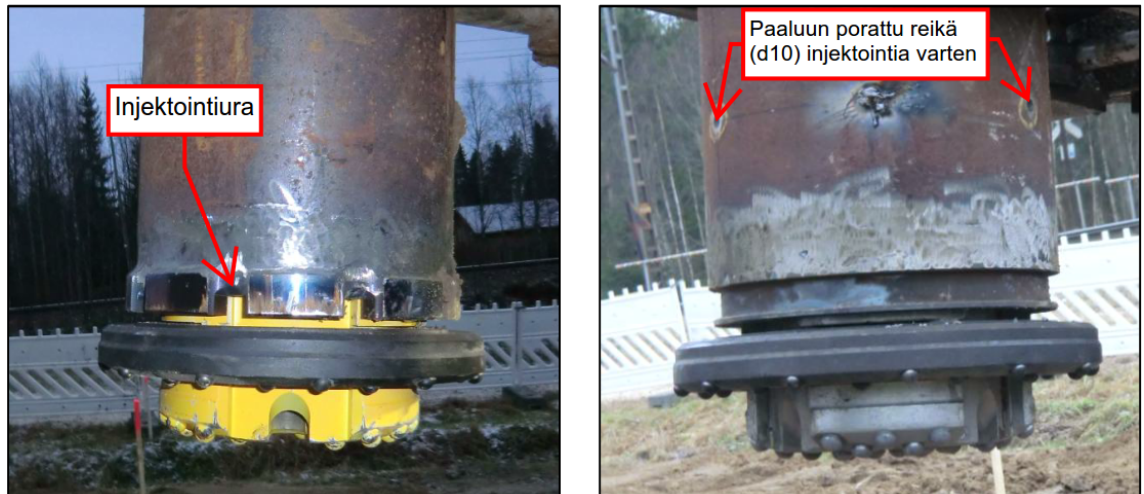
### Avarrinkruunut

Avarrinkruunuina käytettiin rengasteriä. Porauksessa käytettiin 3 erikokoista avarrinkruunua. Avarrinkruunun aikaansaama paalun ulkopinnan ja kallion välinen nimellinen välys oli avarrinkruunusta riippuen 8,5 mm, 14,5 mm tai 29 mm (taulukko 19). Osa paaluista porattiin irtorengasmallin ja osa rengasteräsettimallin avarrinkruunuilla.

*Taulukko 19 Avarrinkruunun koko ja tyyppi sekä injektointimenetelmä paalukohtaisesti.*

Paalu	Avarrinkruunun koko / välys [mm]	Avarrinkruunun tyyppi	Injektointimenetelmä
1	Ylikoko / 29	Irtorengasmalli	Injektoitava maakenkä
2	Normaalikoko / 8,5	Irtorengasmalli	Mansetti-injektointi, 1-taso
3	Normaalikoko / 8,5	Irtorengasmalli	Injektoitava maakenkä
4	Ylikoko / 29	Irtorengasmalli	Mansetti-injektointi, 2-tasoa
5	Ylikoko / 29	Irtorengasmalli	Mansetti-injektointi, 2-tasoa
6	Ylikoko / 29	Irtorengasmalli	2-Mansetti-injektointi
7	Ylikoko / 29	Irtorengasmalli	2-Mansetti-injektointi
8	Ylikoko / 29	Irtorengasmalli	2-Mansetti-injektointi
9	Normaalikoko / 14,5	Rengasteräsettimalli	Mansetti-injektointi, 1-taso
10	Normaalikoko / 14,5	Rengasteräsettimalli	Injektoitava maakenkä
11	Normaalikoko / 14,5	Rengasteräsettimalli	Mansetti-injektointi, 2-tasoa
12	Normaalikoko / 14,5	Rengasteräsettimalli	Mansetti-injektointi, 2-tasoa
13	Normaalikoko / 14,5	Rengasteräsettimalli	Injektoitava maakenkä
14	Normaalikoko / 14,5	Rengasteräsettimalli	Injektoitava maakenkä
15	Normaalikoko / 8,5	Irtorengasmalli	Mansetti-injektointi, 2-tasoa

9 kpl paaluista porattiin irtorengasmallilla (kuva 67).



Kuva 67 Irtorengasmallin avarrinkruunut ja maakengät sekä pilottikruunu. Vasemmalla on injektoitava maakenkä ja oikealla normaalimaakenkä.

6 kpl paaluista porattiin rengasteräsettimallilla (kuva 68).



Kuva 68 Rengasteräsettimallin avarrinkruunut ja maakengät. Vasemmalla on injektoitava maakenkä ja oikealla normaalimaakenkä.

### 8.2.2 Paalujen huuhtelu

Ennen paalujen injektointia paalut huuhdeltiin vedellä. Huuhtelu tehtiin mansetin avulla ja eri menetelmin injektointitavasta riippuen.

Yhdeltä tasolta tehtävässä mansetti-injektoinnissa mansetti laskettiin 5,8 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin se jäi 100 mm reikätaason yläpuolelle. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten, ja paaluun pumpattiin 200 litraa vettä. Tämän jälkeen mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja nostettiin ulos paalusta.



Kahdelta tasolta tehtävässä mansetti-injektoinnissa mansetti laskettiin 5,8 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin se jäi 100 mm alemman reikätaason yläpuolelle, ja mansetin ylempi tiivistinosa peitti ylemmät reiät. Näin vältettiin huuhteluveden pääsy paalun sisään. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten, ja paaluun pumpattiin 200 litraa vettä. Tämän jälkeen mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja nostettiin ulos paalusta.

Maakenkä-injektoinnissa mansetti laskettiin 5,8 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin se jäi 200 mm maakengässä olevien urien yläpuolelle. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten, ja paaluun pumpattiin 200 litraa vettä. Tämän jälkeen mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja nostettiin ulos paalusta.

Kaksoismansetti-injektoinnissa mansetti laskettiin 6,0 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin mansetin keskiosa sijoittui alemman reikätaason kohdalle. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten, ja paaluun pumpattiin 200 litraa vettä. Tämän jälkeen mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja nostettiin ulos paalusta.

Vesihuuhtelun aikana mitattiin painetta. Suurimmassa osassa paaluista huuhtelupaine ei noussut yli 0,5 bar. Muutamassa paalussa paine nousi alussa noin 1,5 bar, mutta laski nopeasti alle 0,5 bar. Huuhtelupaineet on esitetty paalukohtaisesti injektointipöytäkirjassa (liite 1).

### 8.2.3 Paalujen injektointi

Injektointimassa sekoitettiin työmaalla ja pumpattiin injektointiletkujen kautta ensin mansettiputkeen ja sitten paaluun. Injektointipainetta mitattiin injektoinnin aikana painemittarilla, joka oli sijoitettu injektointiletkun ja mansettiputken väliin.

#### Injektointikalusto

Sekoittimena käytettiin PFT HM 24-ruuvisekoitinta (kuva 69). Sen pumppauskapasiteetti on 20–50 l/min.



Kuva 69

PFT HM 24 –ruuvisekoitin.

Pumppuna käytettiin CURA2500-laastipumppua (kuva 70), jonka maksimituotto on 25 l/min. Säiliön tilavuus on 65 litraa.



Kuva 70 CURA 2500 –laastipumppu.

Injektointimassa ohjattiin mansetin kautta paalun alaosaan. Mansetti koostui 6 m pitkstä metalliputkesta ( $d=60\text{mm}$ ) sekä kahdesta hydraulisesti kiristettävästä kumisesta tiivistinosasta (kuva 71). Injektointiaine pumpattiin mansetin kautta paalun sisään.



Kuva 71 Injektointityössä ja vesihuuhtelussa käytettävä mansetti.

Mansetissa on reikä ja tulppa pohjassa sekä kahden tiivistinosan välissä (kuva 72). Injektointimenetelmästä riippuen avattiin joko pohjatulppa tai välitulppa. Näin injektointimassa pääsi leviämään paaluun ja edelleen paalun ja kallion väliseen tilaan.





Kuva 72 Mansetissa on reikä sekä pohjassa että kyljessä. Injektointimenetelmästä riippuen suljetaan joko pohjatulppa (oikealla) tai välitulppa (vasemmalla).

### Injektointimassa

Injektointimassa valmistettiin työmaalla injektointilaastista ja vedestä. Injektointilaastina käytettiin Nonset 50 FF-tuotetta, joka on sementtipohjainen kuivalaasti (kuva 73). Se paisuu 1 – 3 % ennen sitoutumista. Se on pakkasenkestävää, ja sitä voidaan käyttää  $-25^{\circ}\text{C}$  asti. Laastin maksimiraekoko on 0,2 mm. Injektointimassa valmistettiin valmistajan ohjeen mukaisesti eli yhtä 25 kg säkkiä kohden käytettiin 10 litraa vettä. Näin w/c-suhteeksi tuli 0,4. Veden tuli olla lämmintä siten, että massan lämpötila oli sekoitettaessa noin  $+20^{\circ}\text{C}$ .



Kuva 73 Injektointimassa valmistettiin työmaalla. Injektointilaastina käytettiin Nonset 50 FF –tuotetta.



Injektointiainetta pumpattiin paalun ja kallion väliin 3 x paaluputken ja kallion välin teoreettinen tilavuus. Injektointiainetta pumpattaessa oli huomioitava paalun sisään jäävä massamäärä.

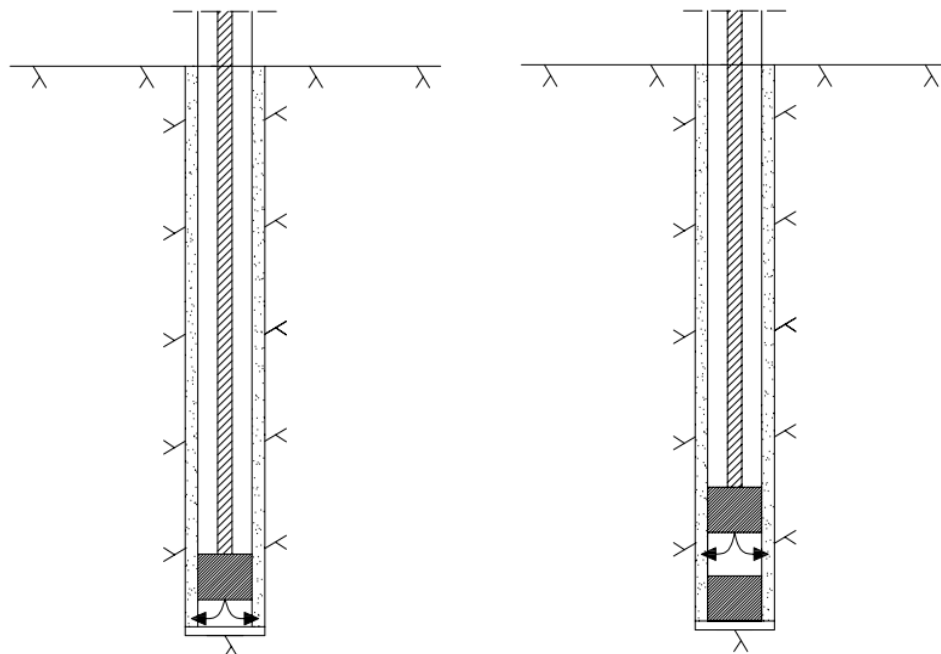
*Taulukko 20 Taulukossa on esitetty injektointiaineen kokonaismäärät paalukohtaisesti.*

Paalu	Injektointiaineen määrä [l]		Paalu	Injektointiaineen määrä [l]
1	240		9	95
2	80		10	95
3	80		11	192
4	224		12	96
5	224		13	160
6	262		14	160
7	262		15	160
8	262			

Injektointiaineen määrät on esitetty injektointivaiheittain injektointipöytäkirjassa (liite 1).

### Injektointimenetelmät

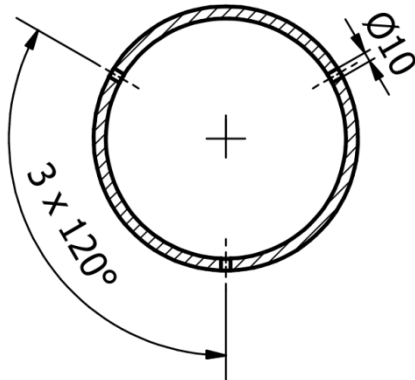
Paalujen injektoinnissa käytettiin 3 eri menetelmää (kuva 74). Kaikissa menetelmissä injektointi suoritettiin mansettiputken kautta. 'Mansetti-injektointi' sekä 'Injektointi maakengän kautta' toteutettiin siten, että injektointiaine levisi paaluun mansetin alareian kautta. 'Kaksoismansetti-injektoinnissa' massa levisi paaluun kahden tiivistinosan välissä olevasta reiästä.



*Kuva 74 Injektoinnin periaatekuvat. Vasemmalla 'mansetti-injektointi' sekä 'injektointi maakengän kautta' ja oikealla 'kaksoismansetti-injektointi'.*

### Mansetti-injektointi

Menetelmässä injektointiaine pumpattiin paaluun tehtyjen 10 mm halkaisijaltaan olevien reikien kautta paalun ulkopinnan ja kallion väliin (kuva 75). Reikiä tehtiin 3 kpl paalun kehälle tasaisin välein.

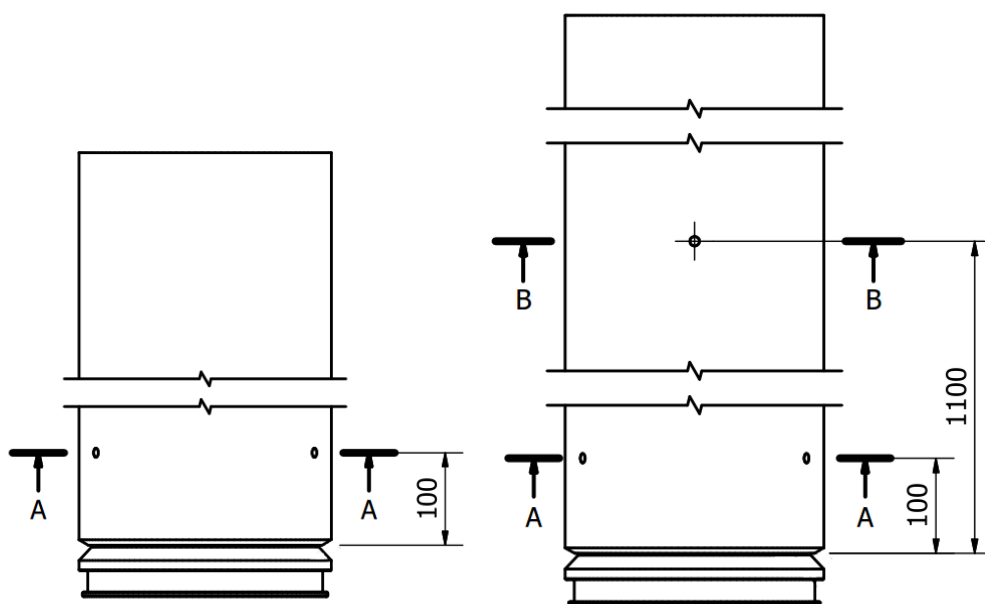


Kuva 75 Mansetti-injektoinnissa paaluihin tehtiin 3 kpl d10mm reikiä tasavälein paalun kehälle.

Menetelmässä mansetin pohjatulppa avattiin, ja välitulppa pidettiin suljettuna. Menetelmässä injektointi toteutettiin joko yhdeltä tai kahdelta tasolta. Yhdeltä tasolta toteutettavassa injektoinnissa reikien korkeustaso oli 100 mm paalun alareunasta ylöspäin (kuva 76). Kahdelta tasolta toteutettavassa injektoinnissa korkeustasot olivat 100 mm ja 1100 mm paalun alareunasta ylöspäin (kuva 76). Tasojen välillä oli vaiheittaissiirto, jolla pyrittiin varmistamaan injektointiaineen leviäminen mahdollisimman laajalti paalun kehälle. Vaiheittaissiirto on esitetty kuvassa 79.

Yhdeltä tasolta tehtävässä mansetti-injektoinnissa mansetin alapinta laskettiin 5,8 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin se jäi 100 mm reikätaason yläpuolelle. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten ja injektointiaine pumpattiin mansetin läpi paalun alaosaan ja edelleen paalun ja kallion väliseen tilaan. Kun suunniteltu massamäärä oli pumpattu, mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja mansettia nostettiin hitaasti ylös massaa koko ajan pumpaten. Kun saavutettiin arvioitu kalliopinnan taso, massan pumppaus lopetettiin. Mansetti nostettiin ulos paaluputkesta. 2 kpl paaluista injektointiin kyseisellä menetelmällä.

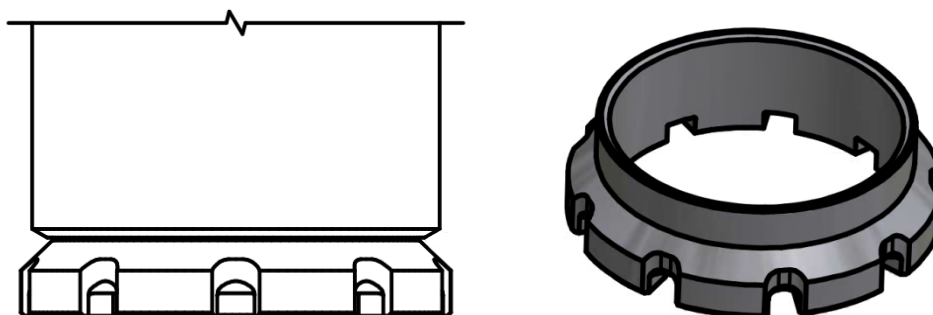
Kahdelta tasolta tehtävässä mansetti-injektoinnissa mansetin alapinta laskettiin ensin 5,8 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin se jäi 100 mm alemman reikätaason yläpuolelle. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten ja injektointiaine pumpattiin mansetin läpi paalun alaosaan ja edelleen paalun ja kallion väliseen tilaan. Kun suunniteltu massamäärä oli pumpattu, mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja mansettia nostettiin hitaasti 1,0 m ylöspäin massaa koko ajan pumpaten. Mansetin alapinta jäi 100 mm ylempään reikätaason yläpuolelle. Tämän jälkeen mansetti kiristettiin uudelleen paalun sisäpintaa vasten. Injektointiainetta pumpattiin suunniteltu määrä. Tämän jälkeen mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta, ja mansettia nostettiin hitaasti ylöspäin massaa koko ajan pumpaten. Kun saavutettiin arvioitu kalliopinnan taso, massan pumppaus lopetettiin. Mansetti nostettiin ulos paaluputkesta. 5 kpl paaluista injektointiin kyseisellä menetelmällä.



Kuva 76 Reikätasojen etäisyydet paalun alapinnasta. Vasemmalla 1-tasolta mansetti-injektoitava paaluputki ja oikealla 2-tasolta mansetti-injektoitava paaluputki.

#### Injektointi maakengän kautta

Menetelmässä injektointiaine pumpattiin maakenkään tehtyjen urien kautta paalun ulkopinnan ja kallion väliin (kuva 77). Maakenkään tehtyjä uria oli 9 kpl.



Kuva 77 Kuvassa on esitetty injektoitava maakenkä. Injektointimassa leviää maakengän urien kautta paaluputken ja kallion väliin.

Menetelmässä mansetin alapinta laskettiin 5,9 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin se jäi noin 100 mm maakengässä olevien injektointiurien yläpuolelle. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten ja injektointiaine pumpattiin mansetin läpi paalun alaosaan ja edelleen paalun ja kallion väliseen tilaan. Kun suunniteltu massamäärä oli pumpattu, mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja mansettia nostettiin hitaasti ylös massaa koko ajan pumpaten. Kun saavutettiin arvioitu kalliopinnan taso, massan pumppaus lopetettiin. Mansetti nostettiin ulos paaluputkesta. 5 kpl paaluista injektointiin kyseisellä menetelmällä. Kuvassa 78 on esitetty menetelmässä käytettävä maakenkä.

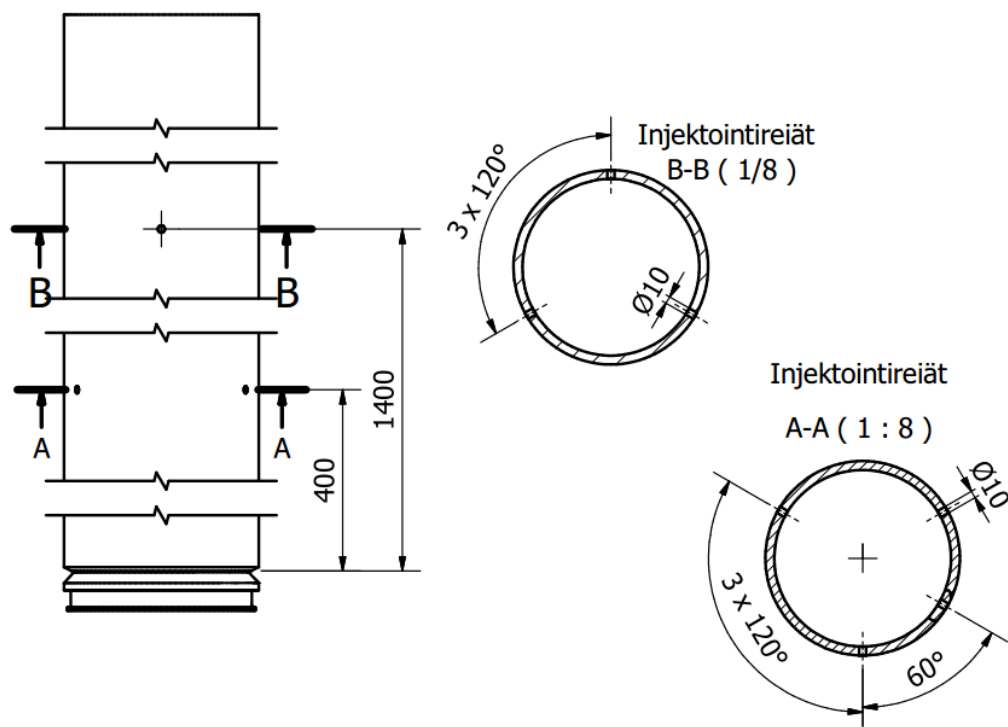


Kuva 78 Injektoitavan maakengän irtorengasmalli.

#### Injektointi kaksoismansetilla

Menetelmässä injektointiaine pumpattiin paaluun tehtyjen 10 mm halkaisijaltaan olevien reikien kautta paalun ulkopinnan ja kallion väliin (kuva 79). Reikiä tehtiin 3 kpl paalun kehälle tasaisin välein. Reikiä oli kahdella eri korkeustasolla. Korkeustasot olivat 0,4 m ja 1,4 m paalun alareunasta ylöspäin. Tasojen välillä oli vaiheittaissiirto, jolla pyrittiin varmistamaan injektointiaineen leviäminen mahdollisimman laajalti paalun kehälle.

Menetelmässä mansetin välitulppa avattiin, ja pohjatulppa pidettiin suljettuna. Mansetin alapinta laskettiin 6,0 m paalun yläreunasta alaspäin, jolloin mansetin keskiosa sijoittui alemman reikätasoon kohdalle. Mansetti kiristettiin paalun sisäpintaa vasten, ja injektointiaine pumpattiin mansetin välireiän kautta paaluun ja edelleen paaluun tehtyjen reikien kautta paalun ja kallion väliseen tilaan. Kun suunniteltu massamäärä oli pumpattu, mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta ja mansettia nostettiin hitaasti 1,0 m ylöspäin massaa koko ajan pumpaten. Tämän jälkeen mansetti kiristettiin uudelleen paalun sisäpintaa vasten. Injektointiainetta pumpattiin suunniteltu määrä. Tämän jälkeen mansetti irrotettiin paalun sisäpinnalta, ja mansetti nostettiin ulos paalusta. 3 kpl paaluista injektointiin kyseisellä menetelmällä.



Kuva 79 Reikätasojen etäisyydet paaluputken alapinnasta sekä injektointireikien sijoittuminen paalun kehällä. Reikätasojen välillä on vaiheittaissiirto.

Taulukossa 21 on esitetty paalukohtaisesti injektointimenetelmät sekä reikä- ja injektointiuratasot etäisyytenä kallioreiän pohjalta.

Taulukko 21 Injektointimenetelmät sekä reikätasot paalukohtaisesti.

Paalu	Injektointimenetelmä	Reikä- ja injektointiuratasot (etäisyys kallioreiän pohjalta) [mm]	
		1. taso	2. taso
1	Injektoitava maakenkä	40	-
2	Mansetti-injektointi, 1-taso	200	-
3	Injektoitava maakenkä	40	-
4	Mansetti-injektointi, 2-tasoa	200	1200
5	Mansetti-injektointi, 2-tasoa	200	1200
6	2-Mansetti-injektointi	500	1500
7	2-Mansetti-injektointi	500	1500
8	2-Mansetti-injektointi	500	1500
9	Mansetti-injektointi, 1-taso	200	-
10	Injektoitava maakenkä	100	-
11	Mansetti-injektointi, 2-tasoa	200	1200
12	Mansetti-injektointi, 2-tasoa	200	1200
13	Injektoitava maakenkä	100	-
14	Injektoitava maakenkä	100	-
15	Mansetti-injektointi, 2-tasoa	200	1200

**Injektointipaine**

Injektointipainetta mitattiin injektoinnin aikana painemittarilla, joka oli sijoitettu injektointiletkun ja mansettiputken väliin (kuva 80).



*Kuva 80 Injektointipainetta mitattiin mansettiputken yläpäässä painemittarilla.*

Suurimmassa osassa paaluista injektointipaine ei noussut yli 0,5 bar. Paaluissa nro 1 ja 3 injektointipaine nousi alussa noin 1 bar, mutta laski nopeasti alle 0,5 bar. Injektointipaineet on esitetty paalukohtaisesti injektointipöytäkirjassa (liite 1).

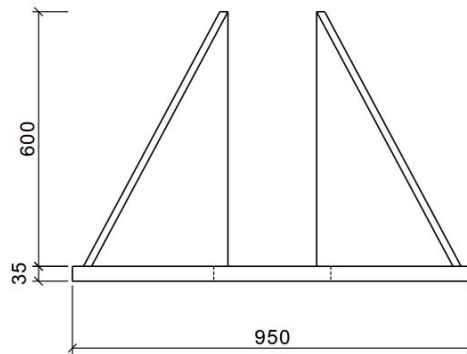
**8.2.4 Kaivuvaihe**

Paalujen injektoinnin jälkeen kallionpinta kaivettiin paalujen ympäriltä esiin. Kallionpinta paljastettiin 3 m kummankin paalurivin ulkopuolelle. Kaivannon luiskat tehtiin 1:1,5 kaltevuuteen. Maapeitteen paksuus vaihteli 2,5–3,5 m välillä. Maalaji oli hiekkainen silttimoreeni, jonka seassa oli isoja kiviä.

Pohjatutkimustulosten perusteella kallionpinta vaikutti melko tasaiselta. Kallionpinnan tason vaihtelu näytti tutkimusten perusteella olevan suurimmillaan noin 40 cm (kuva 81).







Kuva 83 Kuvissa on esitetty paalukonsoli.

### Tasausvalut

Koekuormitusta varten kallionpinnalle tehtiin tasausvalut, koska kuormitusrakenteet vaativat tasaisen alustan. Koska kalliopinnan korkeusasema vaihteli suuresti koeken-  
tän kohdalla, tasausvalut toteutettiin raudoitettuina anturoina (kuva 84).

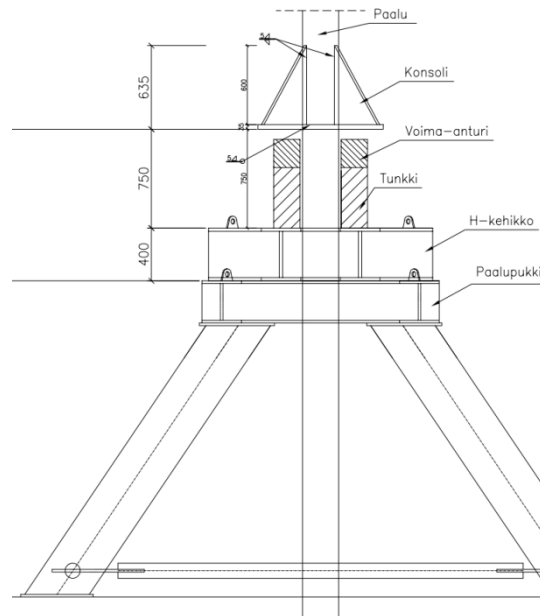


Kuva 84 Paaluihin hitsattiin paalukonsolit kiinni. Tasausvalut tehtiin anturoina.

### 8.2.6 Koekuormitusvaihe

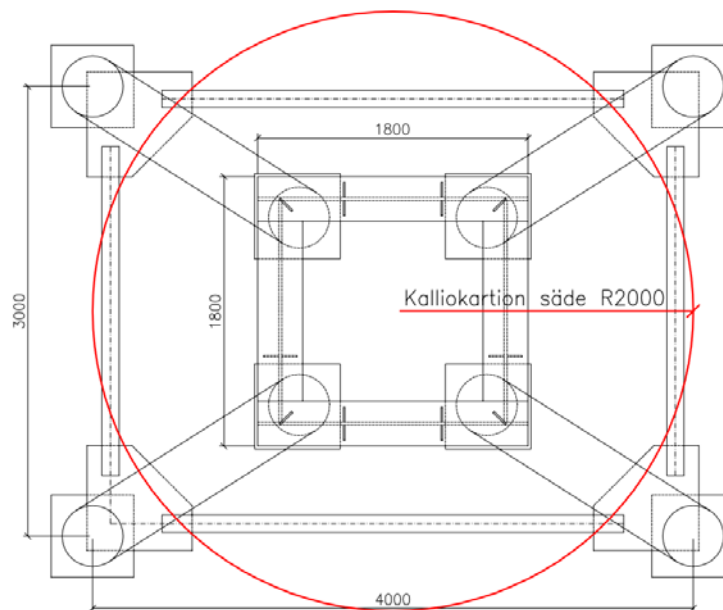
Koekuormituksessa testattiin kallioon injektoimalla ankkuroitujen teräsputkiporapaa-  
lujen vetokestävyys. Kuormituksessa paaluja vedettiin ulos kallioista 2 tai 4 tunkin  
avulla. Tunkit asetettiin paalupukki-rakenteen päälle (kuva 85 ja 87). Tunkkaus tehtiin  
paaluun hitsattua paalukonsolia vasten, jolloin paaluun saatiin aikaan vetokuormitus.  
Paalupukin ja tunkkien väliin asetettiin H-kehikko, jotta tunkit sijoittuivat paalukon-  
solin alle. Tunkkien ja paalukonsolin väliin asetettiin voima-anturit, joilla paalua  
kuormittavaa voimaa mitattiin. Voima-antureilta data välittyi mittausyksikölle, joka  
tallensi tiedot sekunnin välein.





Kuva 85 Koekuormitusjärjestelyt.

Paalupukin vinojalat ulottuivat vaakasuunnassa 2 m paalusta ulos, joten koekuormituksessa huomioitiin myös mahdollinen kalliokartion irtoaminen (kuva 86).



Kuva 86 Tasokuva paalupukista sekä kalliokartion laajuus, kun porausvyvyys on 2 m kallioon.



Kuva 87 Koekuormitusjärjestelyt.

Paalun siirtymää mitattiin siirtymäantureiden avulla. Paalun ympärille kiinnitettiin panta, joka liikkui paalun mukana. Siirtymäanturit kiinnitettiin teräsprofiileihin, jotka tukeutuivat anturoiden päälle ja pysyivät kuormituksen aikana paikallaan (kuva 88). Näin voitiin määrittää paalun liike suhteessa teräsprofiileihin. Paalun siirtymää mitattiin kahdella siirtymäanturilla, joista data välittyi mittausyksikköön sekunnin välein.



Kuva 88 Paaluun kiinnitettiin panta, jonka siirtymää siirtymäanturit mittasivat.

Kallionpinnan siirtymiä mitattiin siirtymäantureiden avulla. Kallionpinnalle asetettiin metallipaino, josta lähti rautalanka siirtymäanturiin (kuva 89). Siirtymäanturit kiinnitettiin teräsprofiileihin samoin kuten paalun siirtymää mitattaessa. Kallionpinnan liikkeessä liike välittyi siirtymäantureille. Kallionpinnan siirtymää mitattiin 2 eri etäisyydeltä paalun molemmin puolin. Etäisyydet olivat noin 0,5 m ja 1,0 m paalusta. Tarkat etäisyydet paaluittain on esitetty liitteessä 3 (Kallionpinnan siirtymät).



Kuva 89 Kallionpinnan siirtymää mitattiin 4 siirtymäanturilla.

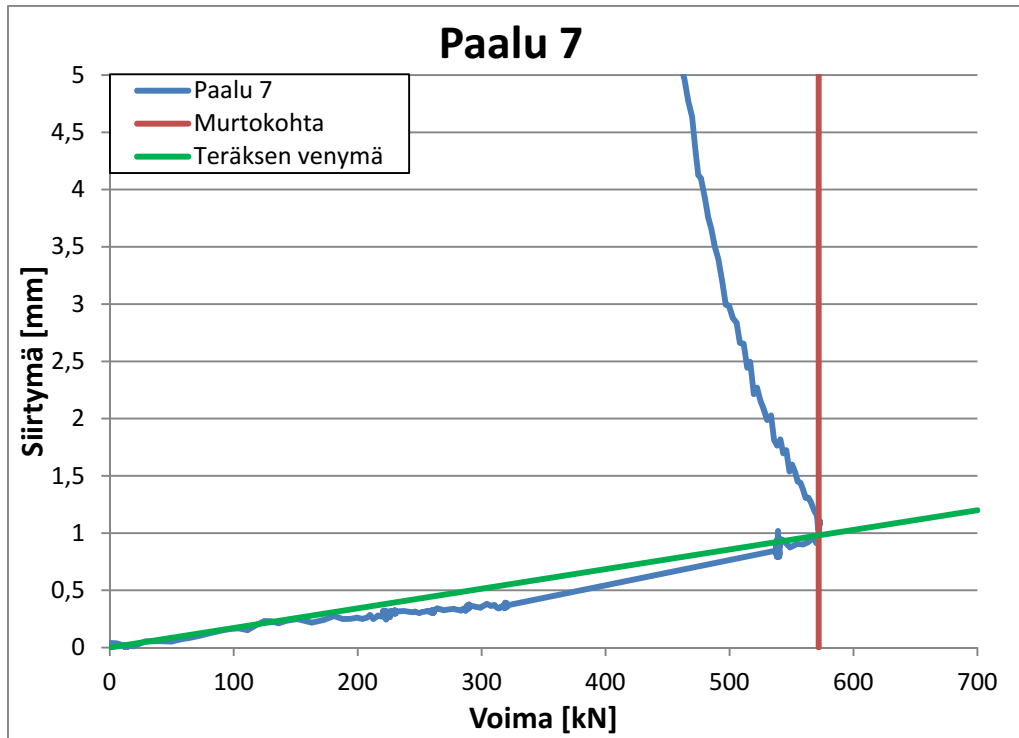
## 8.3 Koestuksen tulokset

### 8.3.1 Murtokuormat

Paalujen murtokuormat määritettiin voima-siirtymä-käyttäytymisen perusteella. 12 paalun kuormittamisessa käytettiin 4 hydraulitunkkia. Tällöin aloituskuorma oli noin 220–240 kN. 3 paalun (nro 1, 2 ja 9) kuormittamisessa käytettiin 2 hydraulitunkkia, jolloin aloituskuorma oli noin 120 kN.

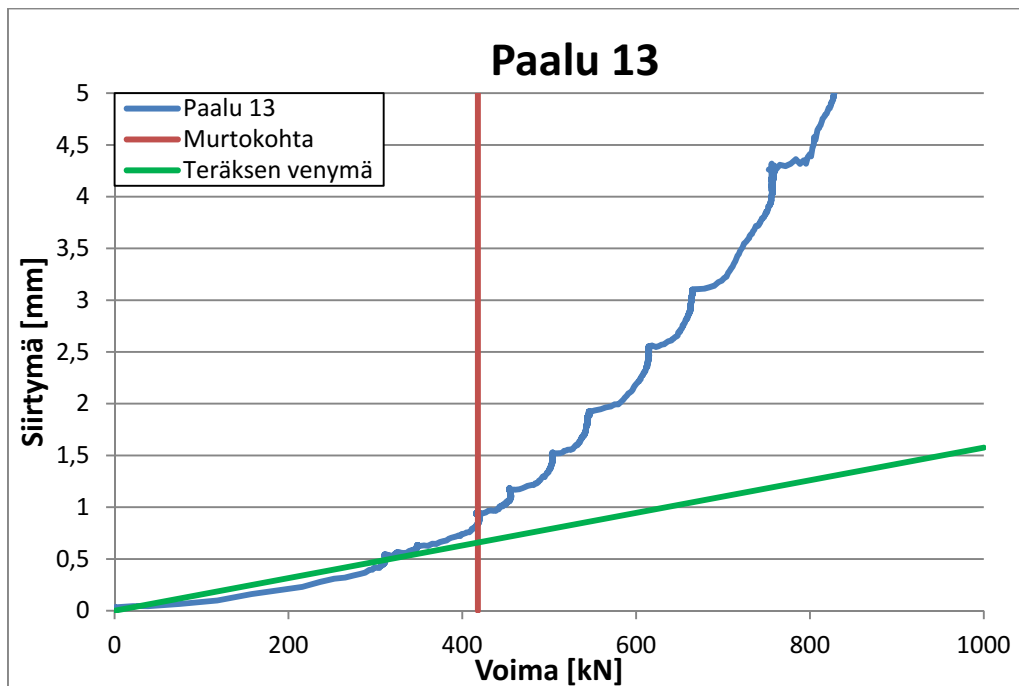
#### Murtokuorman määrittäminen

Paalujen voima-siirtymä-käyttäytymisessä oli kahta eri mekanismia. Paalut, jotka oli porattu irtorengasmallin avarrinkruunuilla, ottivat voimaa vastaan murtokohtaan asti ja tämän jälkeen voima pieneni ja siirtymä kasvoi selvästi (kuva 90). Murtokohta määritettiin kohtaan, jossa voiman määrä pieneni tai siirtymä kasvoi vakiovoimalla.



Kuva 90 Paalun nro 7 voima-siirtymä-käyttäytyminen. Paalu on porattu irtorengasmallin avarrinkruunulla.

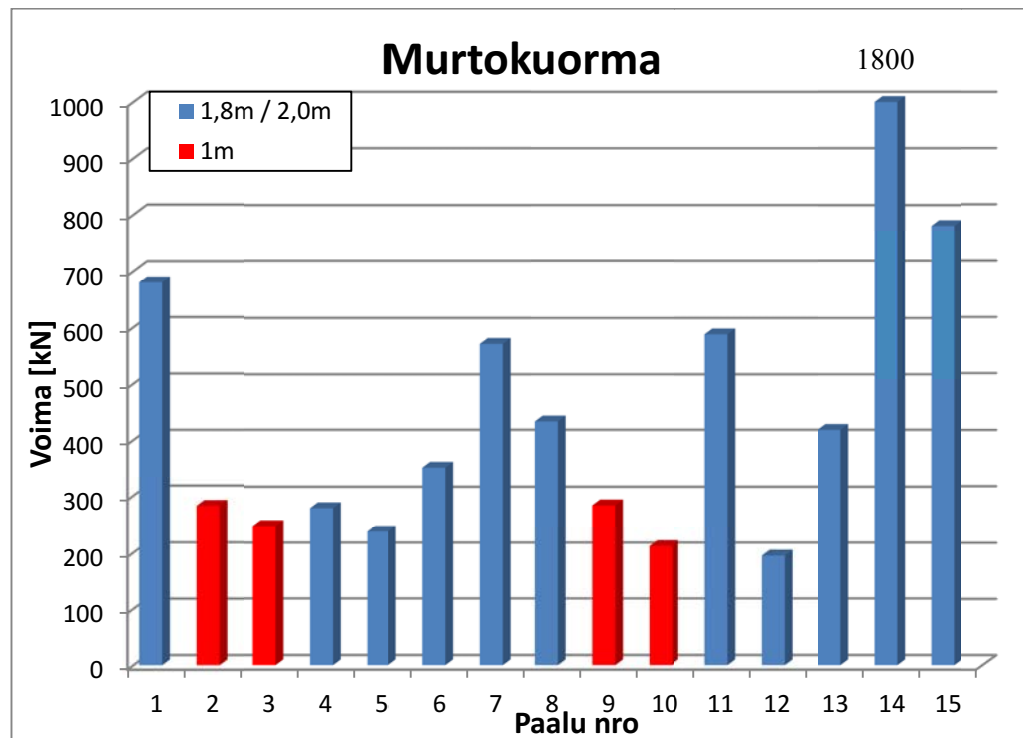
Rengasteräsettömallin avarrinkruunuilla poratuilla paaluilla murtokohta ei ollut yhtä selvästi määritettävissä. Niissä voiman määrä ei pienentynyt, vaikkakin siirtymä kasvoi selvästi. Murtokohta määritettiin kohtaan, jossa paalun voima-siirtymä-käyrä poikkesi selvästi laskennallisesta teräksen venymäsuorasta (kuva 91). Voima-siirtymä-kuvaajat on esitetty paalukohtaisesti liitteessä 2 (Voima-siirtymä-kuvaajat).



Kuva 91 Paalun nro 13 voima-siirtymä-käyttäytyminen. Paalu on porattu rengasteräsettömallin avarrinkruunulla.

### Tulokset

Murtokuorman pienin arvo oli 195 kN ja suurin 1800 kN. Noin puolet tuloksista oli 200–300 kN välillä. Kuvassa 92 on esitetty paalujen murtokuormat.



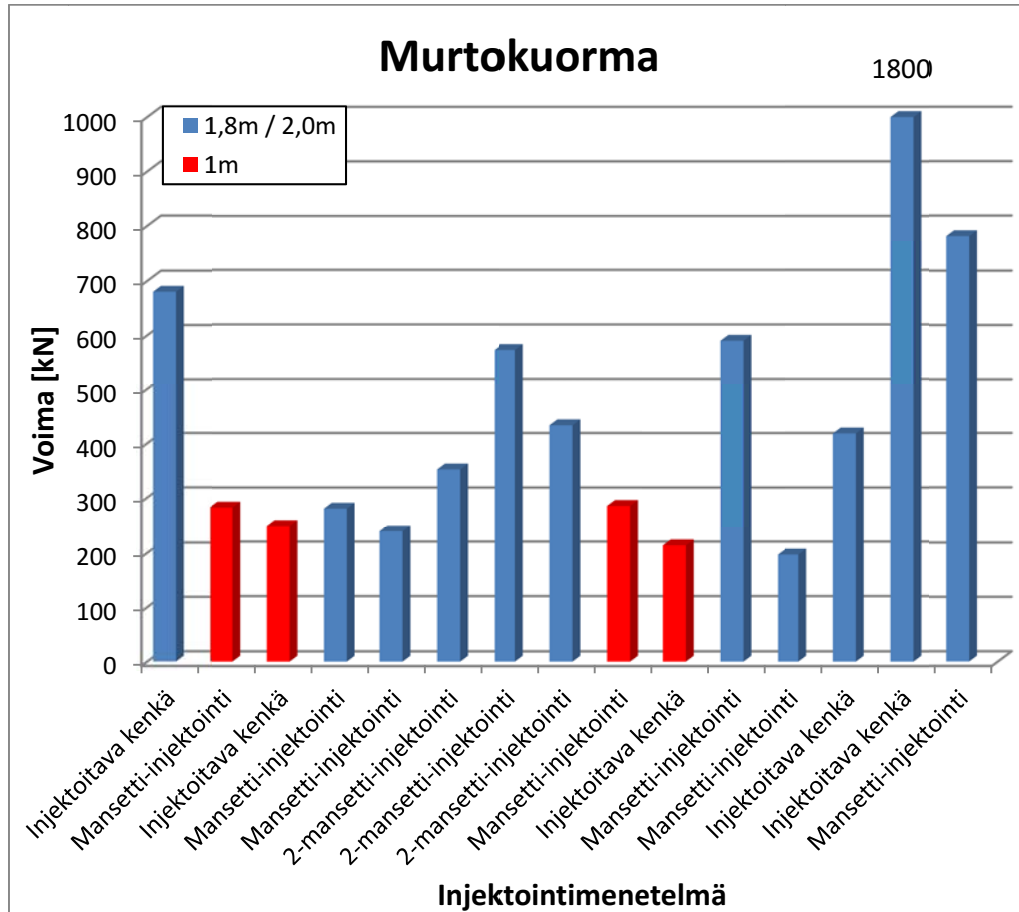
Kuva 92 Paalujen murtokuormat.

Mansetti-injektoinnissa murtokuormat vaihtelivat pääosin 200–300 kN välillä. Paaluissa nro 11 ja 15 murtokuormat olivat kuitenkin 590–780 kN. Injektoitavalla kengällä tehdyissä paaluissa murtokuormat vaihtelivat 200–1800 kN välillä. Kaksoismansetilla tehdyissä paaluissa murtokuormat vaihtelivat 350–570 kN välillä, ja keskiarvo oli 452 kN.

Mansetti-injektoinnilla tehdyissä paaluissa poraussyvyydellä ei näytä olevan juurikaan vaikutusta murtokuormaan. Injektoitavalla kengällä tehdyissä paaluissa sen sijaan näkyy selvästi poraussyvyyden vaikutus. 1 m syvyyteen kallioon poratuilla paaluilla murtokuorma on selvästi pienempi kuin 2 m poratuilla.

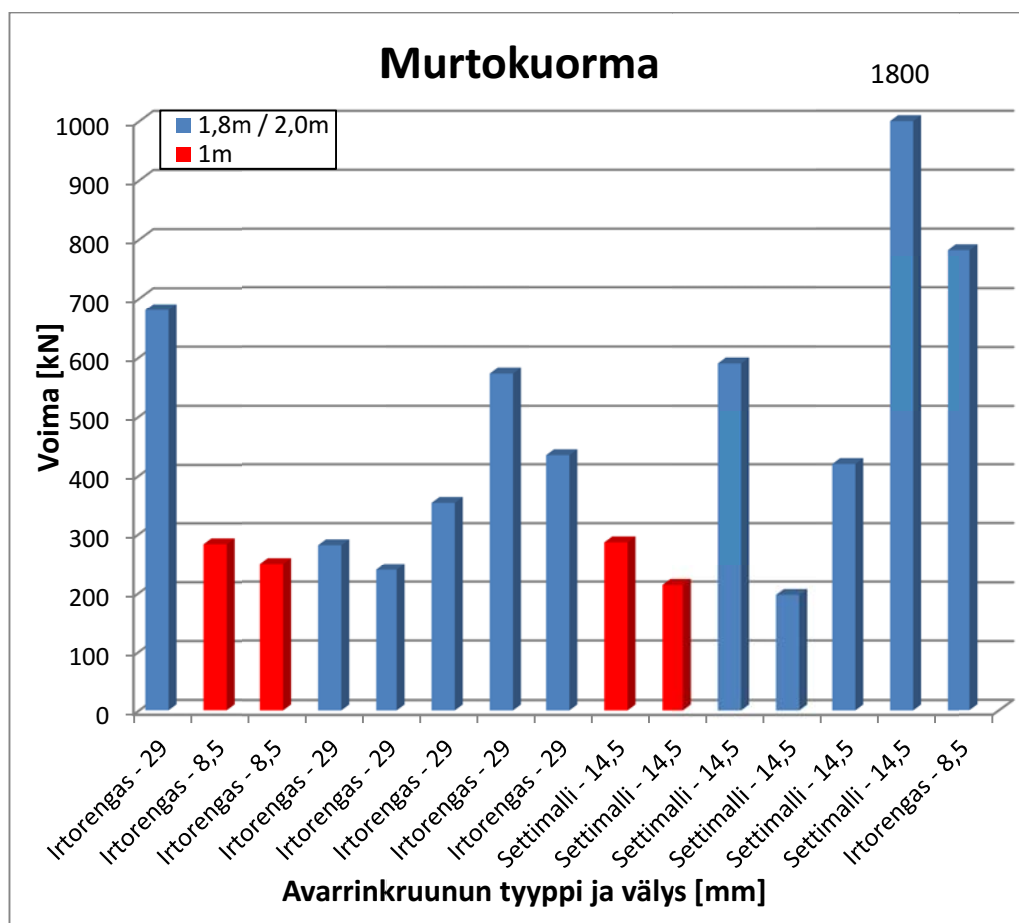
1 m syvyyteen kallioon porattujen paalujen (nro 2, 3, 9 ja 10) murtokuormat ovat varsin lähellä toisiaan. Tulokset vaihtelevat 212...285 kN, ja keskiarvo on 256 kN.

1,8 ja 2,0 m syvyyteen kallioon porattujen paalujen murtokuormien keskiarvo on 453 kN. Keskiarvon määrittämisessä ei ole huomioitu paalua nro 14, koska sen tulos (1800 kN) poikkeaa selvästi muista tuloksista. Kuvassa 93 on esitetty paalujen murtokuormat injektointimenetelmittain.



Kuva 93 Murtokuormat injektointimenetelmittain.

Avarrinkruunun koolla ja tyypillä ei ole selvää vaikutusta murtokuorman suuruuteen (kuva 94). Suuria murtokuormia on saavutettu sekä ylikoon että normaalikoon avarrinkruunuilla ja sekä irtorengasmallilla että rengasteräsettimallilla.

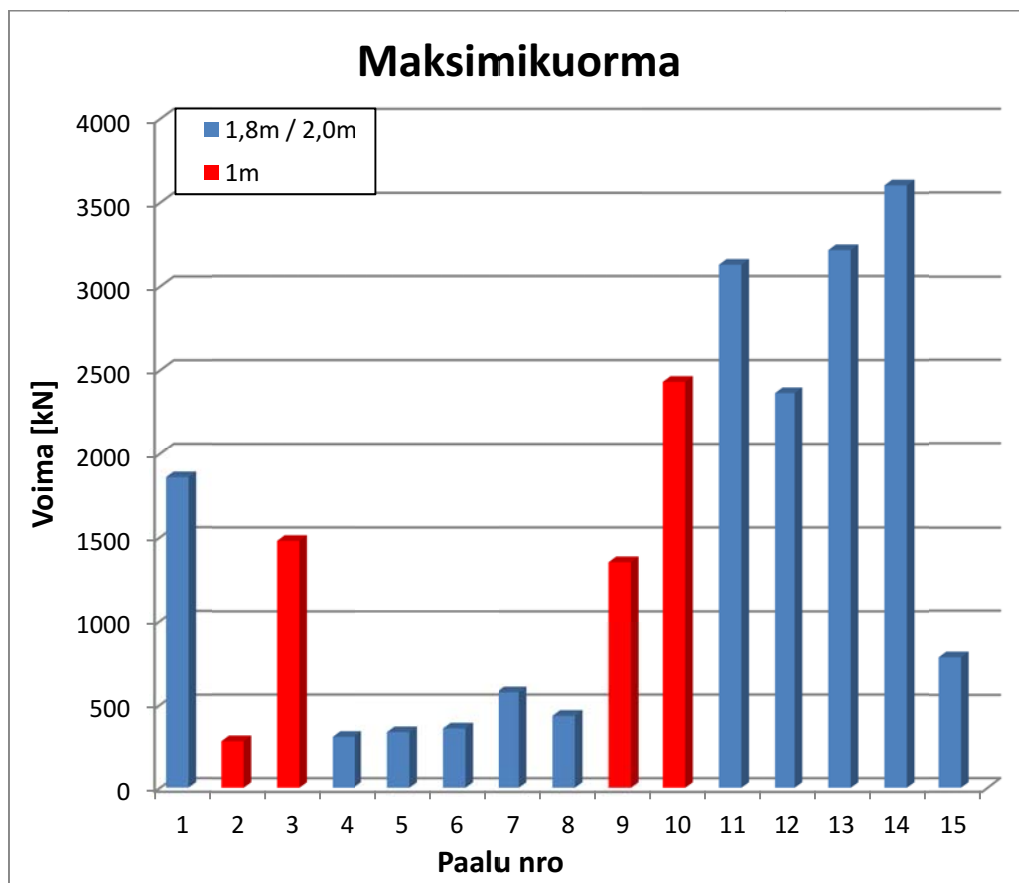


Kuva 94 Murtokuormat avarrinkruunun tyypin ja koon mukaan.

### 8.3.2 Maksimikuormat

Maksimikuormaksi on määritetty kunkin paalun kohdalla saavutettu suurin kuorman arvo. Maksimikuormissa oli suurta vaihtelua. Koestustulokset vaihtelivat hieman alle 300 kN:stä yli 3600 kN:iin, joka oli myös hydraulitunkkien maksimivoima.

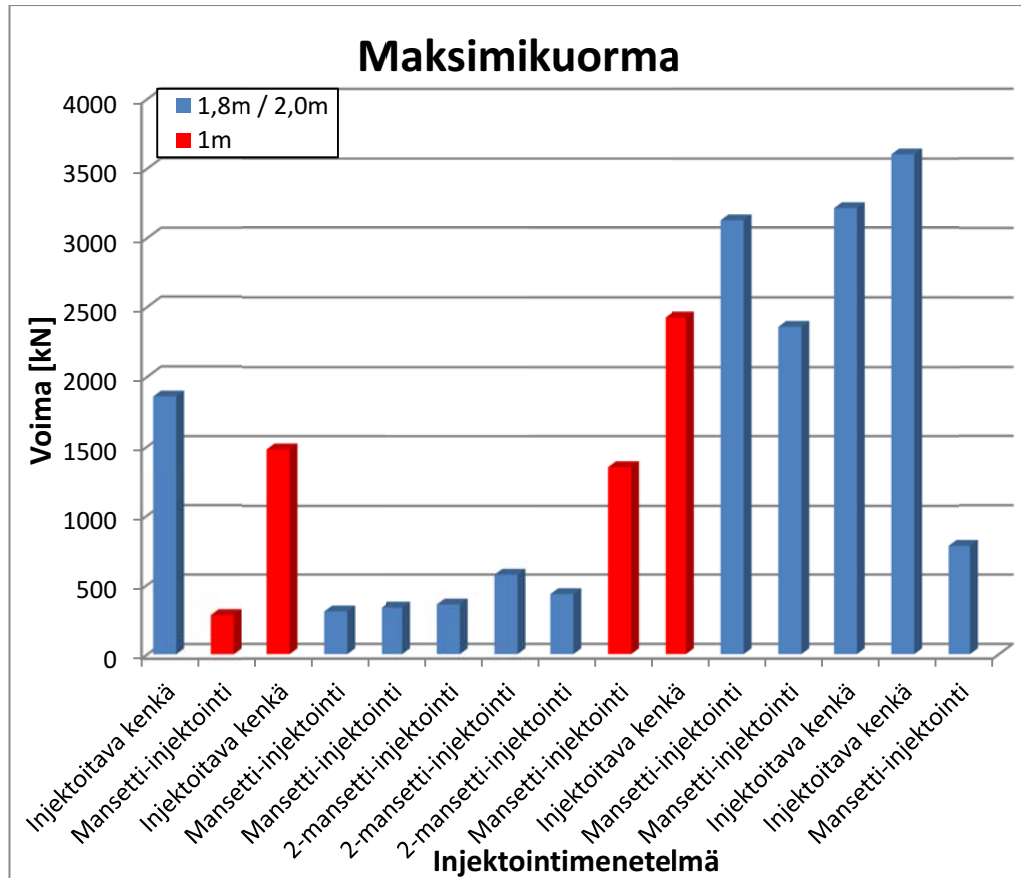
Paalujen nro 1, 13 ja 14 kohdalla todellista maksimikuormaa ei saatu määritettyä. Paalujen nro 1 ja 14 kohdalla tunkkien kapasiteetti rajoitti maksimikuorman kuvassa 95 esitettyyn arvoon. Paalu nro 14 katkesi maksimikuormalla, koska hitsausauma petti jatkoskohdassa. Paalu nro 1 kuormitettiin 2 hydraulitunkilla. Paalun nro 13 kohdalla kuormittaminen lopetettiin 3200 kN kohdalla. Kuvassa 95 on esitetty paalujen maksimikuormat.



Kuva 95 Paalujen maksimikuormat.



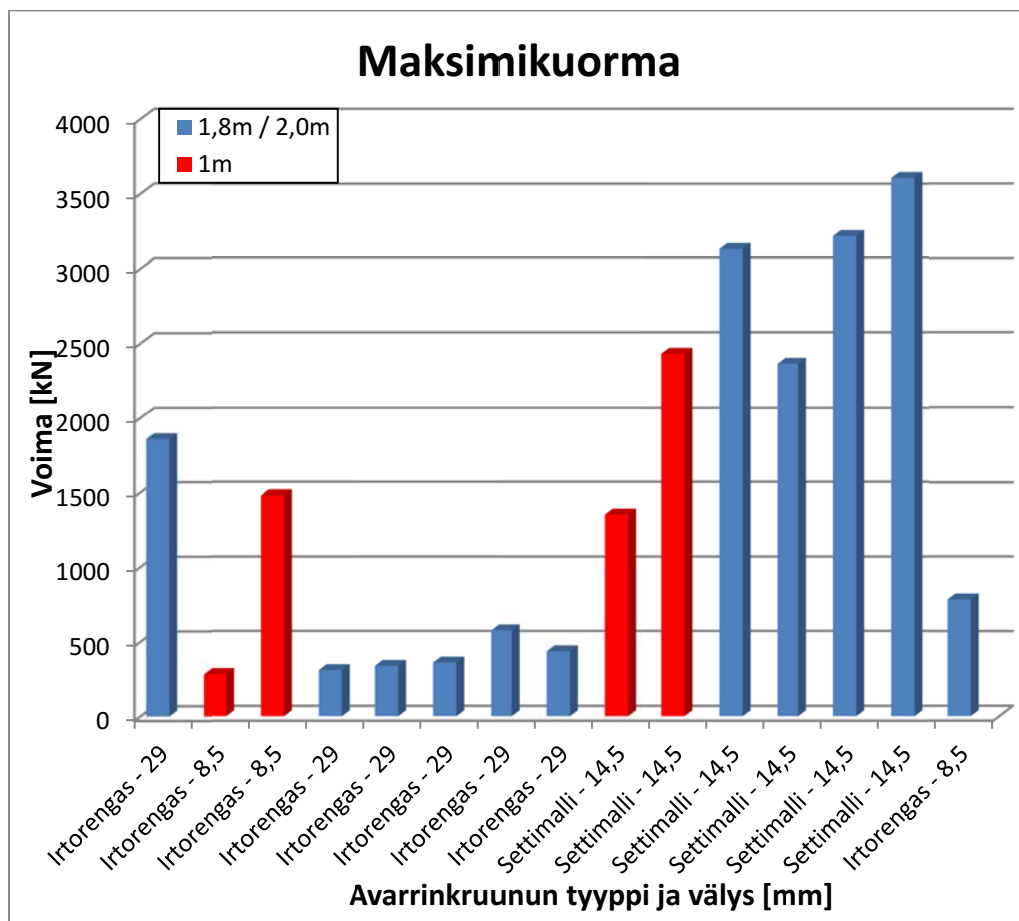
Paalujen, jotka on porattu injektoitavalla maakengällä, maksimikuormat ovat vähintään noin 1500 kN. Mansetti-injektoinnilla ja kaksoismansetti-injektoinnilla tehtyjen paalujen maksimikuormat vaihtelevat 300–3200 kN välillä. Injektoitavalla maakengällä saavutetaan siis huomattavasti suurempi maksimikuorma. Kuvassa 96 on esitetty paalujen maksimikuormat injektointimenetelmittain.



Kuva 96 Paalujen maksimikuormat injektointimenetelmittain.

Avarrinkruunun tyypin vaikutus maksimikuormaan on merkittävä (kuva 97). Rengas-  
teräsestimmallin avarrinkruunuilla pienin maksimikuorman arvo on 1350 kN. Irtoren-  
gasmallin avarrinkruunuilla suurin osa tuloksista on alle 600 kN.

Avarrinkruunun koolla ei sen sijaan näytä tulosten perusteella olevan vaikutusta maksimikuormaan kuten ei ollut murtokuormaankaan.



Kuva 97 Maksimikuormat avarrinkruunun tyypin ja koon mukaan.

### 8.3.3 Kallionpinnan siirtymät

Mittaustulosten perusteella 7 paalun kohdalla kallionpinnalla tapahtui siirtymiä. Kallion rengasteräsettimallilla poratuilla paaluilla havaittiin kallionpinnalla siirtymiä. Taulukossa 22 on esitetty kallionpinnalla tapahtuneet siirtymät paalukohtaisesti.

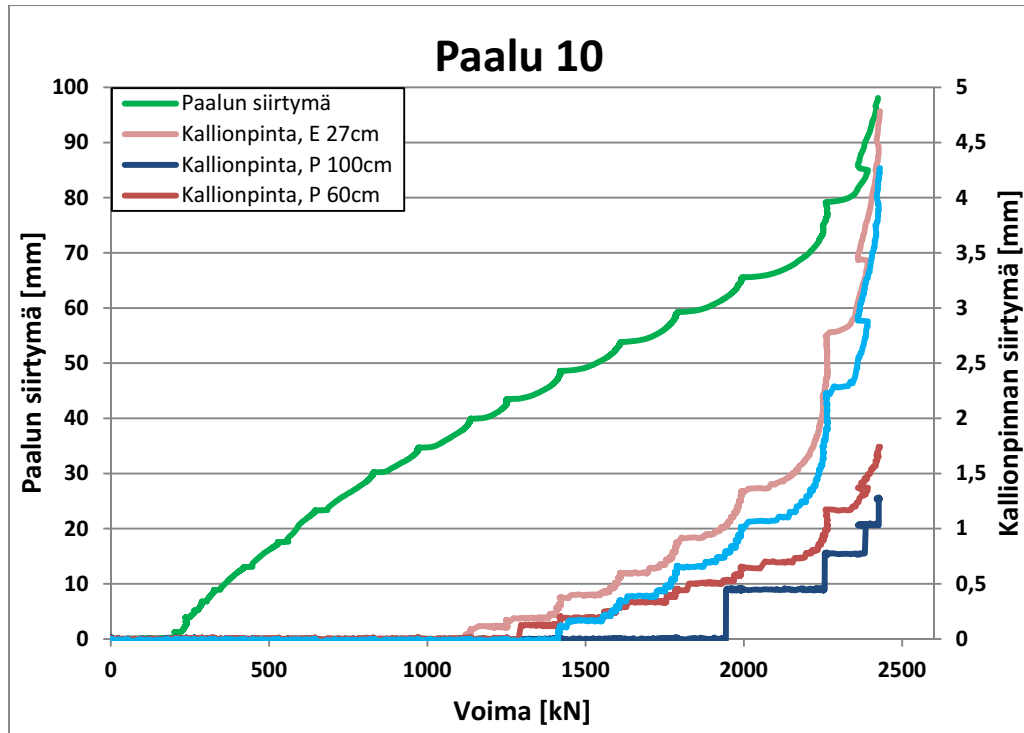
Paalujen nro 3, 9 ja 13 kohdalla kallionpinnalla havaittiin liikettä jo alle 500 kN voimalla. Paalun nro 13 kohdalla siirtymiä havaittiin 750 kN voimalla, ja paalujen nro 10, 11 sekä 12 osalta vasta selvästi yli 1000 kN voimalla. Paalujen nro 3, 9, 10, 12 ja 14 kohdalla havaittiin yli 1 mm siirtymiä. Nämä siirtymät ilmenivät yli 1000 kN voimalla.

Kalliokartion paino on 15 kN, kun poraussyvyys kallioon on 1 m ja 125 kN, kun poraussyvyys on 2 m. Näin ollen kallionpinnalla havaitut siirtymät tapahtuivat huomattavasti kalliokartion painoa suuremmilla kuormilla.

Taulukko 22 Kallionpinnalla tapahtuneet siirtymät paalukohtaisesti.

Paalu	Havaittiin- ko liikettä?	Kuorma [kN], jolla ilmeni havaittavaa liikettä (0,1mm) sekä anturin etäi- syys paalusta [m]	Kuorma [kN], jolla ilmeni 1 mm siirtymä sekä anturin etäisyys paalusta [m]	Avarrinkruunun tyyppi
1	Ei	-	-	Irtorengas
2	Ei	-	-	Irtorengas
3	Kyllä	260 / 0,76	1100 / 0,76	Irtorengas
4	Ei	-	-	Irtorengas
5	Ei	-	-	Irtorengas
6	Ei	-	-	Irtorengas
7	Ei	-	-	Irtorengas
8	Ei	-	-	Irtorengas
9	Kyllä	270 / 0,56	1030 / 0,56	Rengasterä- settimalli
10	Kyllä	1110 / 0,27	1900 / 0,27	Rengasterä- settimalli
11	Kyllä	1440 / 0,70	-	Rengasterä- settimalli
12	Kyllä	1100 / 0,72	1380 / 0,72	Rengasterä- settimalli
13	Kyllä	750 / 0,70	-	Rengasterä- settimalli
14	Kyllä	385 / 0,60	1280 / 0,60	Rengasterä- settimalli
15	Ei	-	-	Irtorengas

Kuvassa 98 on esitetty paalun nro 10 voima-siirtymä-kuvaaja sekä kallionpinnan siirtymät paalun vieressä. Siirtymämittauspisteiden sijainti on ilmoitettu etäisyytenä paalun keskeltä joko etelän tai pohjoisen suuntaan. Muiden paalujen, joissa tapahtui kallionpinnan siirtymiä, vastaavat kuvaajat on esitetty liitteessä 3 (Kallionpinnan siirtymät).



Kuva 98 Paalun nro 10 siirtymä sekä paalun vierestä mitatut kallionpinnan siirtymät.

### Kalliokartio

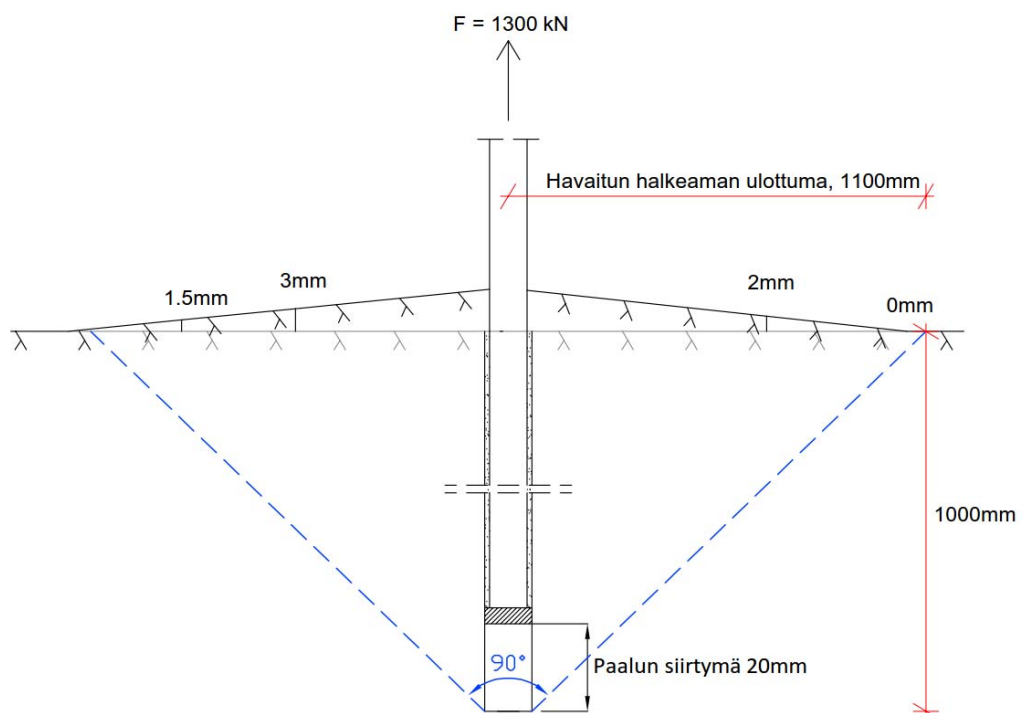
Kalliokartion kokoa voidaan arvioida mitattujen kallionpinnan siirtymien perusteella. Kallionpinnan siirtymiä tapahtui paaluissa nro 3, 9, 10, 11, 12, 13 ja 14. Siirtymiä mitattiin kunkin paalun vierestä neljällä siirtymäanturilla. Anturit oli sijoitettu noin 0,5 m ja 1 m päähän paalun keskilinjasta paalun molemmin puolin. Paaluissa nro 3, 9, 10, 13 ja 14 kallionpinnan siirtymiä ilmeni kaikilla neljällä siirtymäanturilla. Paaluissa nro 11 ja 12 siirtymiä ilmeni kolmella siirtymäanturilla.

Paalun nro 9 kohdalla kalliokartion säde pystytettiin mittaamaan kuormituksen jälkeen, sillä vastasataneeseen lumeen syntyi halkeama merkiksi kallion liikkeistä. Halkeaman pituus oli noin 110 cm (kuva 99). Paalu oli porattu 1 m syvyyteen kallioon, joten kalliokartion kärkikulmaksi saadaan noin 90°.



Kuva 99 Lumeen pintaan syntynyt halkeama, joka ulottuu 110 cm päähän paalusta.

Kuvassa 100 on esitetty leikkauskuva paalusta nro 9. Kuvassa on esitetty alkuperäinen kallionpinta, noussut kallionpinta sekä kallionpinnalta mitatut siirtymät. Kuvassa on esitetty myös paalun siirtymä, lumen pinnasta määritetty halkeaman ulottuma sekä kalliokartion kärkikulma. Havaitut siirtymät on mitattu hetkellä, jolloin paalua kuormittaa 1300 kN vetokuorma.



Kuva 100 Leikkauskuva paalusta nro 9.

### 8.3.4 Injektointiaineen levittyminen

Injektointiaineen levittyminen paalun kehällä arvioitiin silmämääräisesti kaivuvaiheen jälkeen. Osassa paalukenttää kallionpinta oli vino, mikä vaikeutti havainnointityötä. Osa paaluista oli porattu kalliokuoppaan, joka täyttyi vedestä. Tämä vaikeutti myös havainnointityötä.

Taulukossa 23 on esitetty silmämääräiset havainnot paalukohtaisesti injektointiaineen leviämisestä paalun kehällä kallionpinnan tasossa.

*Taulukko 23 Silmämääräiset havainnot paalukohtaisesti injektointiaineen leviämisestä paalun kehällä kallionpinnan tasossa.*

Paalu nro	Injektointimassan leviäminen paalun kehällä kallionpinnan tasossa [%]	Injektointimenetelmä / Avarrinkruunun koko [N/Y], vällys [mm] / Injektointiaineen määrä [l]
1	100	Injektoitava maakenkä / Y, 29 / 240
2	30	Mansetti-injektointi, 1-taso / N, 8.5 / 80
3	20	Injektoitava maakenkä / N, 8.5 / 80
4	70	Mansetti-injektointi, 2-tasoa / Y, 29 / 224
5	0	Mansetti-injektointi, 2-tasoa / Y, 29 / 224
6	20	2-Mansetti-injektointi / Y, 29 / 262
7	70	2-Mansetti-injektointi / Y, 29 / 262
8	70	2-Mansetti-injektointi / Y, 29 / 262
9	40	Mansetti-injektointi, 1-taso / N, 14.5 / 95
10	65	Injektoitava maakenkä / N, 14.5 / 95
11	100	Mansetti-injektointi, 2-tasoa / N, 14.5 / 192
12	100	Mansetti-injektointi, 2-tasoa / N, 14.5 / 96
13	75	Injektoitava maakenkä / N, 14.5 / 160
14	100	Injektoitava maakenkä / N, 14.5 / 160
15	75	Mansetti-injektointi, 2-tasoa / N, 8.5 / 160

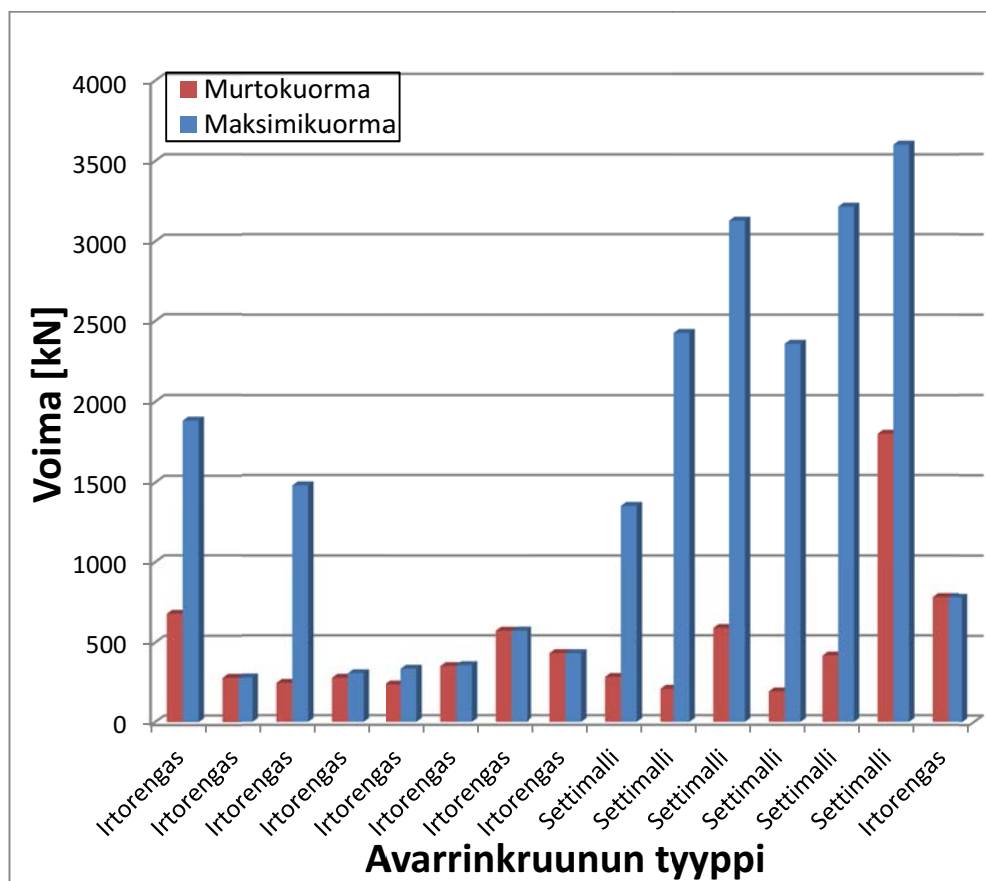
Pääosin massa vaikuttaa levinneen hyvin paalun ympärille. 9 paalun osalta massa on levinnyt vähintään 2/3 paalun kehällä. Injektointimenetelmien välillä ei näytä olevan keskenään eroja. Myöskään avarrinkruunun koolla tai pumpatun injektointimassan kokonaismäärällä ei näytä olevan vaikutusta injektointimassan leviämisestä tehtyihin havaintoihin.

## 8.4 Havaintoja koestuksen tuloksista

### 8.4.1 Murtomekanismi

Lähes kaikissa paaluissa murtuminen tapahtui teräs-laasti-tartunnassa. Myös paalut, joissa tapahtui kallionpinnalla liikkeitä, murtoivat ensin teräs-laasti-kontaktista. Poikkeuksena oli paalu nro 14, jossa murtuminen tapahtui ensin kalliossa. Kallionpinnan siirtymät syntyivät pääosin yli 1000 kN voimalla. Silmämääräiset havainnot paaluputken pinnalta sekä injektointilaastista osoittivat, ettei paaluputken pinta ole todennäköisesti ollut injektointivaiheessa täysin puhdas. Paalun pinnalla on ollut maainesta, joka on heikentänyt teräs-laasti-tartunnan lujuutta merkittävästi.

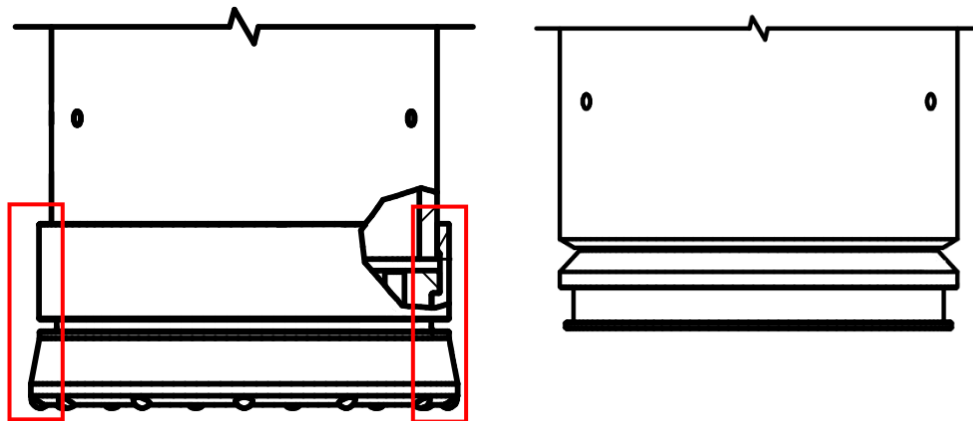
Avarrinkruunun tyypin vaikutus maksimikuorman arvoon on merkittävä (kuva 101). Rengasteräsettimallin avarrinkruunuilla poratuilla paaluilla maksimikuorma oli selvästi murtokuormaa suurempi. Irtorengasmallilla poratuilla paaluilla maksimikuorma ei poikennut juurikaan murtokuormasta lukuun ottamatta paaluja nro 1 ja 3.



Kuva 101 Avarrinkruunun tyypin vaikutus murtokuorman ja maksimikuorman suhteeseen.

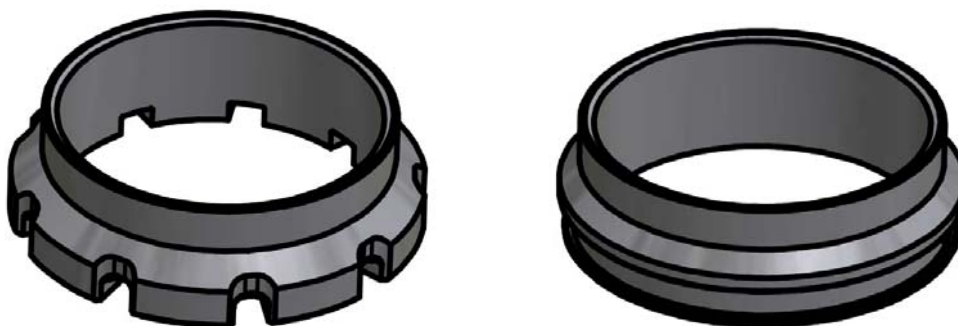
Irtorengasmallissa maakengän ja avarrinkruunun välillä ei juurikaan ole mekaanista kiinnitystä (kuva 102). Näin ollen irtorengasmallissa teräs-laasti-tartunnan pettäessä paaluputki pääsee yhdessä maakengän kanssa vapaasti luistamaan ylöspäin. Koska maakengän ulkohalkaisija on sama kuin paalun, ei maakenkä tuo mekaanista tartuntaa.

Rengasteräsettimallissa sen sijaan paaluputki on mekaanisesti kiinni maakengän lisäksi avarrinkruunussa (kuva 102). Teräs-laasti-tartunnan pettäessä paalu ei pääse luistamaan laastin pintaa pitkin, vaan avarrinkruunun on noustava paaluputken ja maakengän mukana. Koska avarrinkruunun ulkohalkaisija on paaluputken ulkohalkaisijaa suurempi, avarrinkruunu tuo mekaanisen tartunnan teräksen ja laastin välille. Avarrinkruunun on murskattava laastia paalun noustessa. Irtorengasmallin paaluilla pelkkä teräs-laasti-pinnalla tapahtuva liukuminen riittää siirtymien aikaansaamiseksi.



Kuva 102 Vasemmalla rengasteräsettimalli (avarrinkruunu, maakenkä ja paalu) ja oikealla irtorengasmalli (maakenkä ja paalu). Punaisella on merkitty rengasteräsettimallilla syntyvä mekaaninen tartunta.

Paalujen nro 1 ja 3 porauksessa on käytetty 'injektoitavaa maakenkää' (kuva 103). Muut irtorengasmallin paalut on porattu 'normaalilla maakenkällä'. Kokeessa käytetyssä injektoitavassa maakenkässä maakenkän alaosan ulkohalkaisija on paalun ulkohalkaisijaa suurempi. Maakenkä on hitsattu paaluputkeen kiinni, joten maakenkän on noustava paaluputken mukana. Näin ollen paaluputki ei pääse luistamaan laastia pitkin, vaan maakenkän on murskattava injektointilaastia paalun noustessa. Tässä työssä käytetty injektoitava maakenkä tuo mekaanisen tartunnan teräksen ja laastin välille.



Kuva 103 Irtorengasmallin yhteydessä käytetyt maakengät. Vasemmalla on 'injektoitava maakenkä' ja oikealla 'normaali maakenkä'.

Avarrinkruunun tyyppi vaikutti myös kallionpinnan siirtymiin. Siirtymiä tapahtui kaikissa rengasteräsettimallilla poratuissa paaluissa sekä paalussa nro 3, jossa oli injektoitava maakenkä sekä irtorengasavarrin. Tämä johtui siitä, että kyseisillä paaluilla päästiin suuriin, yli 1000 kN, maksimikuormiin.



### Paalukohtaiset kuvat murtomekanismista

Koekuormitusten perusteella paalun murtumismekanismeja on 3 erilaista.

Yleisin on teräs-laasti-tartunnan pettäminen ja voiman pysyvä pieneneminen. Tällöin ei havaittu kallionpinnan liikkeitä. Toinen on teräs-laasti-tartunnan pettäminen, jota seuraa voiman kasvu siirtymän kasvaessa. Tällöin havaittiin kallionpinnan liikkeitä. Kolmannessa murtumismekanismissa kallio murtui, ja kallionpinnalla havaittiin liikkeitä.

Alla on kuvat 3 paalusta, joissa on erilainen murtumismekanismi.

#### Paalu 2

Murtuminen tapahtui teräs-laasti-kontaktissa 282 kN voimalla (kuva 104). Kallionpinnalla ei havaittu liikkeitä.



*Kuva 104 Kuvassa näkyy tummalla kallioraosta ylös luistanut osuus paalusta (n. 170 mm).*

#### Paalu 9

Murtuminen tapahtui ensin teräs-laasti-kontaktissa 285 kN voimalla (kuva 105). Kallionpinnalla havaittiin liikettä 270 kN voimalla. Selviä siirtymiä kallionpinnalla tapahtui 1000 kN voimalla.



Kuva 105 Paalu murtui ensin teräs-laasti-tartunnasta ja sitten kalliosta.

#### Paalu 14

Murtuminen tapahtui kalliosta 1800 kN voimalla (kuva 106).



Kuva 106 Paalu murtui kalliosta.

### 8.4.2 Tartuntalujuus

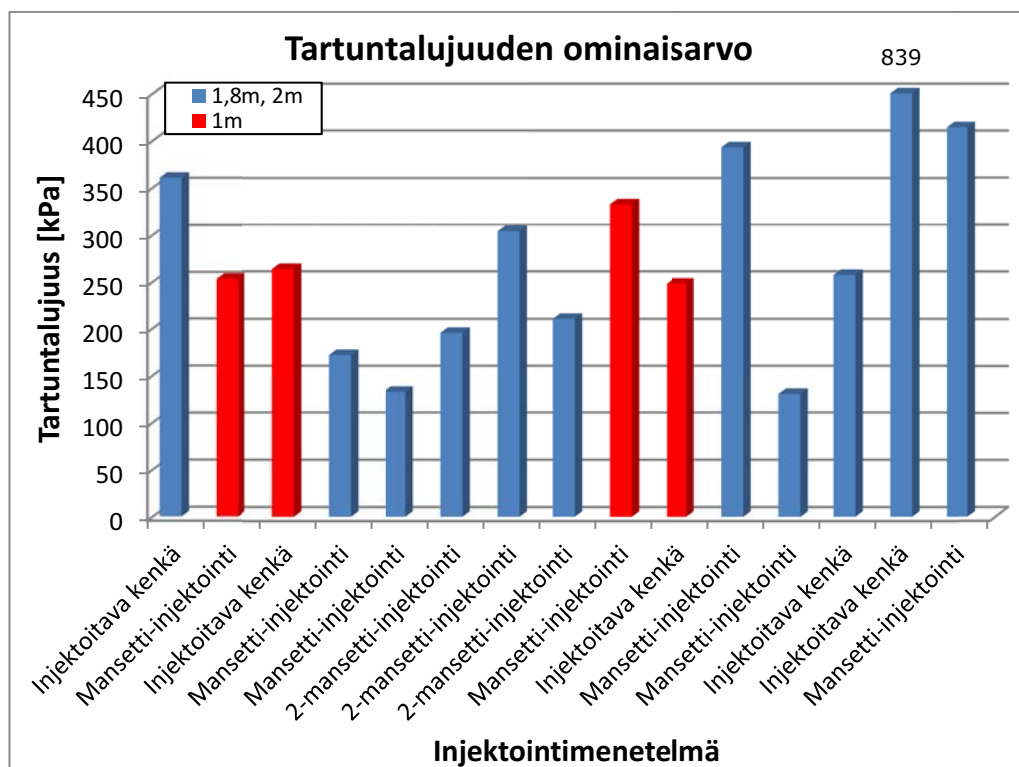
Paalujen murtuminen tapahtui teräs-laasti-tartunnassa, paalua nro 14 lukuun ottamatta. Teräs-laasti-tartuntalujuuden ominaisarvo on määritetty murtokuormien perusteella. Laskennassa on oletettu, että injektointimassa on levinnyt paalun kehälle kauttaaltaan koko poraussyvyyden matkalle. Poraussyvyysinä on käytetty toteutuneita poraussyvyksiä. Tartunnan ominaisarvot sekä tulosten keskiarvo on esitetty alla olevassa taulukossa 24 sekä kuvassa 107.

Taulukko 24 Teräs-laasti-tartuntalujuuden ominaisarvot.

Paalu	Tartuntalujuuden ominaisarvo [kPa]		Paalu	Tartuntalujuuden ominaisarvo [kPa]
1	360		9	332
2	253		10	247
3	263		11	392
4	172		12	130
5	132		13	257
6	195		14	>839
7	303		15	414
8	210		Keskiarvo	262 (ei sisällä nro 14) 300 (sisältää kaikki)

Tartuntalujuuden ominaisarvot vaihtelivat 130–414 kPa välillä. Paalu nro 14 murtui kalliossa, joten tartuntalujuuden ominaisarvoa ei saatu määritettyä. Taulukossa 24 on esitetty tartuntalujuuden minimiarvo. Taulukossa on esitetty tartuntalujuuksista 2 keskiarvoa. Toisessa on huomioitu kaikki 15 paalua. Toisessa paalu nro 14 on jätetty huomiotta. Keskiarvot ovat 300 kPa ja 262 kPa.

Injektoitavalla maakengällä tehdyillä paaluilla tartuntalujuuden pienin arvo on 247 kPa, joka on siis liki keskiarvon suuruinen. Myös 1-tasolta tehdyissä mansetti-injektoituissa paaluissa heikompikin tulos (253) ylittää liki keskiarvoon. 2-mansetti-injektoitujen paalujen tartuntalujuudet vaihtelevat 200...300 kPa. 2-tasolta tehtyjen mansetti-injektoitujen paalujen tartuntalujuuksissa vaihtelu on suurta. Tulokset vaihtelevat 130...390 kPa.

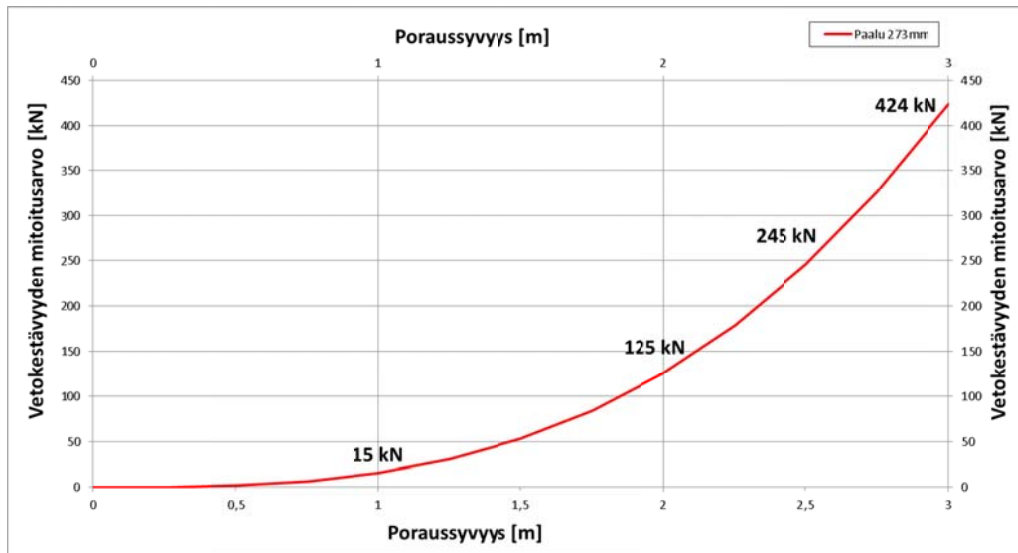


Kuva 107 Teräs-laasti-tartuntalujuuden ominaisarvot injektointimenetelmittain.

### 8.4.3 Tulosten vertailu laskennallisiin tarkasteluihin

#### Murtokuormat

Laskennallisten tarkastelujen perusteella kalliokartion paino on paalun ( $d=273\text{mm}$ ) vetokestävyyttä rajoittava tekijä noin 4 m poraussyvyyteen saakka (kuva 58). Murto-kuormien keskiarvot olivat 256 kN (1m poratut paalut) ja 453 kN (1,8m / 2 m poratut paalut). Murtokuormien keskiarvot ovat siis moninkertaisia kalliokartion painon mukaan laskettuihin arvoihin verrattuna (kuva 108).

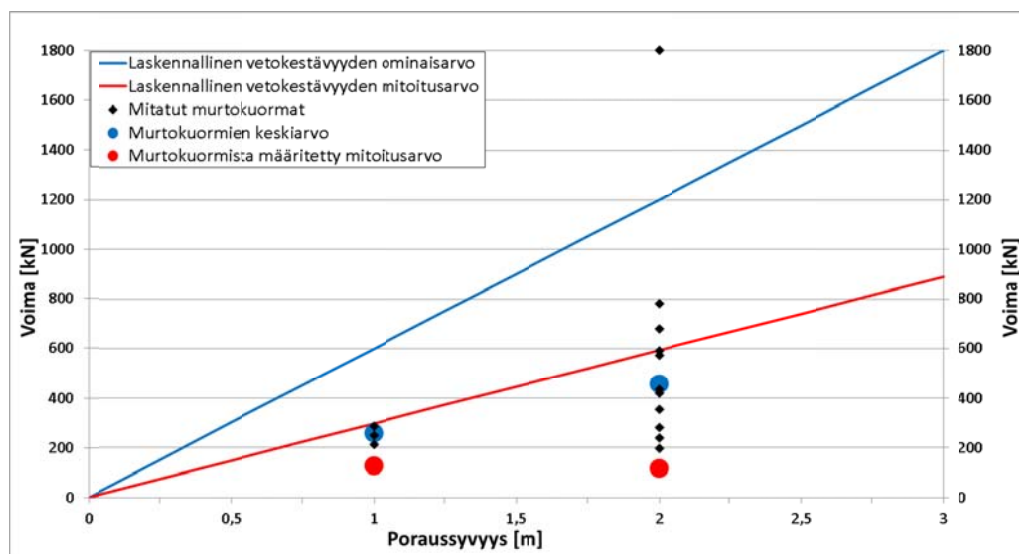


Kuva 108 RD273-paalun kalliokartion mitoittama vetokestävyysmittausarvo poraussyvyyden funktiona.

Kuvassa 109 on esitetty murtokuormat, niiden keskiarvot sekä murtokuormista määritetty mitoitusarvo. Keskiarvo ja mitoitusarvo on esitetty erikseen 1 m kalliioon poratuista ja 1,8 m / 2 m poratuista paaluista. Mitoitusarvo on määritetty kohdan 3.2.2 'Paalun vetokestävyys' alakohdan 'Koeveto' mukaisesti. Mitoitusarvot ovat 125 kN (1m) ja 115 kN (1,8m/2m).

Lisäksi kuvassa 109 on esitetty laskennallinen vetokestävyysarvo sekä mitoitusarvo. Kalliokartiota ei ole huomioitu laskennallisissa arvoissa.





Kuva 109 RD273-paalun laskennallinen vetokestävyys ominaisarvo ja mitoitusarvo, koekuormitustuloksista määritetyt murtokuormat, murtokuormien keskiarvot sekä murtokuormista määritetty mitoitusarvo.

Laskennallinen vetokestävyys mitoitusarvo on noin 2-kertainen murtokuormista määritettyyn mitoitusarvoon verrattuna 1 m porattujen paalujen kohdalla ja noin 5-kertainen 2 m porattujen paalujen kohdalla. Laskennallinen vetokestävyys ominaisarvo on noin 2-kertainen murtokuormien keskiarvoon verrattuna 1 m porattujen paalujen kohdalla ja noin 3-kertainen 2 m porattujen paalujen kohdalla.

### Tartuntalujuus

Koekohteella murtuminen tapahtui ensin teräs-laasti-tartunnassa. Paalutusohjeen (2011) mukaan ominaistartuntalujuus injektointiaineen ja teräksen välillä on suurempi kuin injektointiaineen ja kallion välillä kaikilla Paalutusohjeessa esitetyillä injektointiaineen lujuusluokilla (taulukko 25). Laskennalliseen tartuntakestävyyteen vaikuttaa toki myös tartuntapinta-ala, joka taas on injektointiaineen ja teräksen välillä pienempi kuin injektointiaineen ja kallion välillä.

Taulukko 25 Injektointiaineen ja kallion (i-k) sekä injektointiaineen ja teräksen (i-t) välisen tartunnan ominaisarvot injektointiaineen lujuusluokittain (RIL 254-1-2011, muokattu).

Betonin/laastin/ injektointiaineen lujuusluokka	Ominaistartunta- lujuus, i-k $T_{s;k}$ [MPa]	Ominaistartunta- lujuus, i-t $T_{s;k}$ [MPa]	Mitoittava
C20/25	0,5 – 1,0	1,05	i-k
C25/30	0,55 – 1,1	1,26	i-k
C30/37	0,6 – 1,2	1,4	i-k
C35/45	0,65 – 1,3	1,54	i-k
C40/50	0,7 – 1,4	1,75	i-k
C45/55	0,75 – 1,5	1,89	i-k

Koekohteen tuloksista laskettu ominaistartuntalujuuden keskiarvo on 262 kPa, joka on noin neljäsosa Paalutusohjeen (2011) mukaisesta arvosta. Koekohteen tulosten perusteella Paalutusohjeessa esitetyt teräs-laasti-tartunnan ominaisarvot ovat liian suuria kyseessä olevaa menetelmää käytettäessä.

Suurin tekijä moninkertaisesti pienempään tartuntalujuuden ominaisarvoon lienee epäpuhdas paaluputken pinta (kuva 110). Toinen seikka, josta pienempi tartuntalujuus voi johtua, on se ettei injektointimassa ole levinnyt kauttaaltaan paalun kehälle koko poraussyvyydellä.



*Kuva 110 Kuvassa on paaluputkea vasten ollut injektointimassa-kappale. Pääosin pinta on aivan sileä, mutta keskellä kulkee pystysuuntainen maa-ainesta sisältävä suoni.*

Ruotsalaisen ohjeen 'Stålkärnepålar' mukaan paaluputken ja laastin välistä tartuntaa voidaan parantaa paalun kylkeen hitsattavilla noin 3 mm korkeilla "kierteillä" (Pålkommissionen 2000).

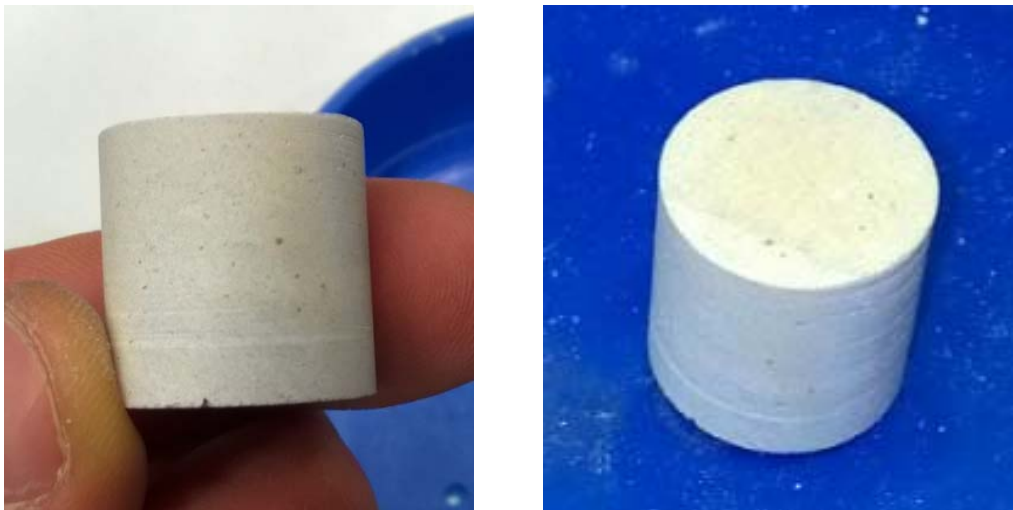
#### 8.4.4 Puristuslujuus

Injektointimassan puristuslujuus määritettiin kallionpinnalta ja kallioraon yläosasta otetuista injektointimassa-kappaleista (kuva 111). Kappaleet otettiin talteen koe-kuormitusten jälkeen, joten osassa kappaleita oli havaittavissa pieniä halkeamia.



*Kuva 111 Kallionpinnalta ja kallioraosta otetut injektointimassa-kappaleet.*

Kappaleista porattiin reikäporalla halkaisijaltaan 20 mm kokoisia näytekappaleita (kuva 112). 7 paalun osalta talteen otetut näytteet olivat riittävän suuria, jotta näytteiden poraaminen oli mahdollista. Näytteiden korkeudet vaihtelivat 16–20 mm välillä. Näytteet sahattiin haluttuun pituuteen käsin rautasahalla, joten näytekappaleiden ylä- ja alapinnoista ei saatu täysin suoria.



*Kuva 112 Poratut näytekappaleet.*

Poratut näytteet kuormitettiin puristuskoelaitteistolla (kuva 113). Laitteisto tuotti jatkuvasti kasvavan voiman. Voima lisääntyi 0,05 kN/s.



Kuva 113 Puristuskoelaitteisto.

Seuraavassa taulukossa (26) on esitetty näytekappaleista määritetyt puristuslujuudet paalukohtaisesti. Taulukkoon on koottu tulosten keskiarvot, sillä paalua nro 11 lukuun ottamatta jokaisen paalun osalta puristuslujuus määritettiin vähintään 3 eri näytekappaleesta.

Taulukko 26 Puristuslujuudet paalukohtaisesti.

Paalun nro	Puristuslujuus [MPa]
4	18,2
7	29,1
9	23,9
10	17,6
11	18,3
13	42,8
14	15,6

Injektointimassa valmistettiin Nonset-laastista ja vedestä. Tuotteen valmistajan ohjeistuksen mukaan massan puristuslujuus saavuttaa 45 MPa +20°C olosuhteissa ja 30 MPa -15°C olosuhteissa. Kallionpinnalla lämpötila on ollut arviolta noin +5°C, joten puristuslujuuden tulisi saavuttaa noin 40 MPa.

Ainoastaan paalusta nro 13 määritetty puristuslujuus saavuttaa 40 MPa. Paalu nro 7 määritetty puristuslujuus on 29 MPa. Loput viisi puristuslujuustuloksista on 15–24 MPa välillä.

Toteutusstandardin (SFS-EN 14199) mukaan puristuslujuuden tulee olla vähintään 25 MPa. Tämä vaatimus täyttyi vain paalujen nro 7 ja 13 osalta.

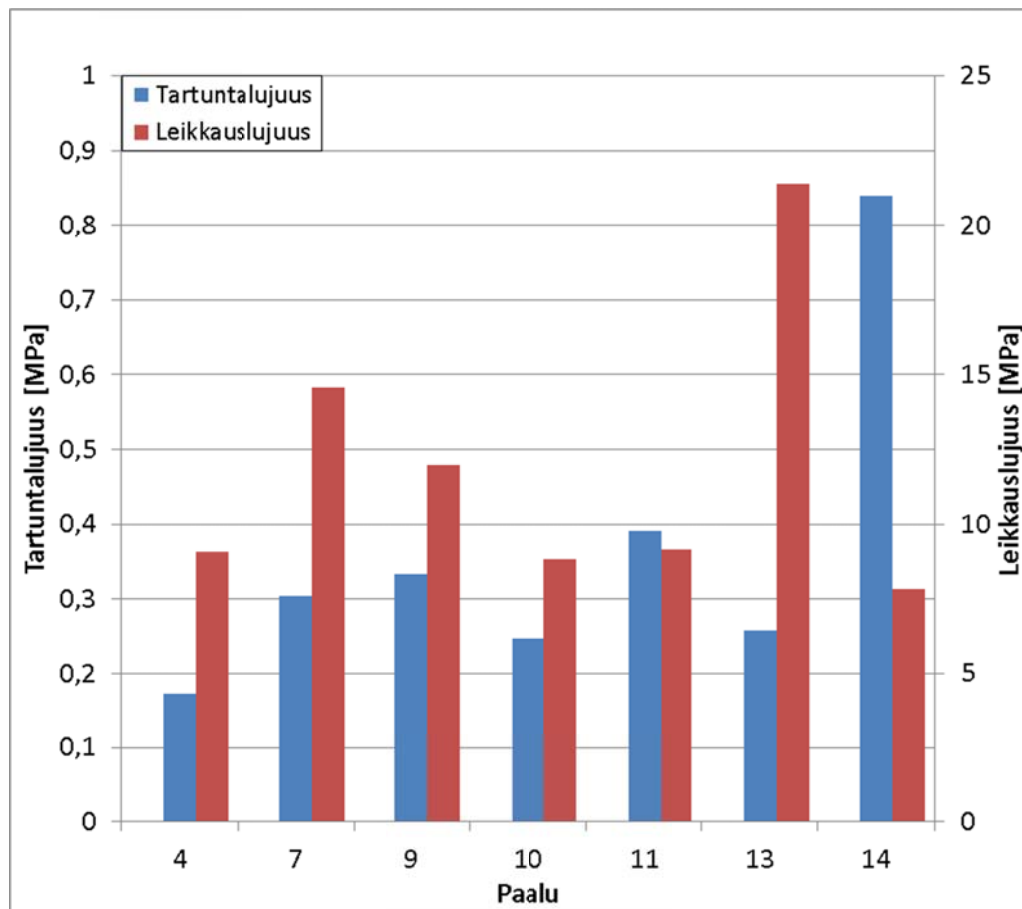


Puristuslujuustuloksista määritettiin injektointimassan leikkauslujuus  $\tau$  kaavalla 17:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (17)$$

missä  $\sigma_1$  on suurin pääjännitys eli puristuslujuus  
 $\sigma_3$  pienin pääjännitys,  $\sigma_3 = 0$  (1-akselialinen kuormitus)

Kuvassa 114 on esitetty paalujen 4, 7, 9, 10, 11, 13 ja 14 injektointimassasta määritetty tartuntalujuus sekä leikkauslujuus.



Kuva 114 Injektointimassan tartuntalujuus sekä leikkauslujuus.

Injektointimassan tartuntalujuus on selvästi alle 1 MPa jokaisen paalun kohdalla. Massan leikkauslujuus on kuitenkin vähintään 7 MPa. Näin ollen injektointimassan leikkautuminen ei ole ollut todennäköinen murtomekanismi koekuormituksessa. Injektointimassan ja paaluputken välinen teräs-laasti-tartunnan kestävyys on määrittänyt murtokohdan.

## 8.5 Koekohteen epävarmuustekijöitä

Suurin epävarmuus koekohteen työn suorituksessa liittyi injektointimassan valmistukseen. Injektointimassaa valmistettaessa vedenannostelija ei toiminut tasaisesti, vaan vettä tuli sekoittajaan välillä yli asetetun rajan ja välillä taas alle asetetun rajan. Näin ollen w/c-suhde ei todennäköisesti ollut koko massassa suunnitellun (0,4) suuruinen. Tuotevalmistajan ohjeistuksesta poikkeava w/c-suhde pienentää massan lujuutta.

Huuhteluvaiheen jälkeen, ennen injektointia, kallioraossa sekä paalussa on vettä. Vesi pyritään syrjäyttämään ominaispainoltaan selvästi suuremmalla injektointimassalla. Kun injektointimassaa pumpataan paaluun ja kalliorakoon, tulisi veden poistua injektointimassan edellä. Injektointi tulee suorittaa siten, ettei injektointimassaa tarvitse pumpata yli 20 cm paksun vesikerroksen läpi. Muutoin injektointimassan huuhtoutumisriski kasvaa oleellisesti, ja w/c-suhde muuttuu radikaalisti. Käytännössä tämä vältetään laskemalla mansetti riittävän lähelle kallioreiän pohjaa.

Koekohteessa käytettiin pakkaslaastia. Tuotevalmistajan ohjeen mukaan massaa sekoitettaessa on käytettävä lämmintä vettä siten, että massan lämpötila on noin +20°C. Massan lämpötila ei saa olla koskaan yli +30°C. Massa valmistettiin paalukentän läheisyydessä työmaalla. Ilman lämpötila oli muutaman asteen pakkasen puolella. Vallinneissa olosuhteissa tuoteohjeen mukaisen massan valmistaminen on haastavaa. Massasta mitatut lämpötilat olivat +25°C ja +32°C. Ohjeistus ylitettiin siis muutamalla asteella. Tällä saattaa olla vaikutusta injektointimassan lujuuteen.

Injektointilaastin maksimiraekoko oli 0,2 mm. Herää kysymys, oliko maksimiraekoko mahdollisesti liian pieni. Vaihtoehtona olisi ollut vastaava tuote 1,5 mm maksimiraekokoilla. Suurempiraekokoisen tuotteen teoreettinen puristuslujuus on noin 10 % suurempi.

Injektointimassa nousi lähes jokaisen paalun kohdalla maanpinnalle saakka. Tämän perusteella arvioidut injektointiainemäärät (3 x kallioraon teoreettinen tilavuus + paalun sisäpuolinen tilavuus) olivat riittäviä. Etäisyys kallioreiän pohjalta maanpinnalle oli suurimmillaan noin 6 m, joten pumpatun injektointiaineen tulisi teoriassakin nousta maanpinnalle saakka, mikäli massa kulkeutuu pelkästään paaluputken vartta pitkin.

Injektointimenetelmällä ei näytä olevan vaikutusta paalujen murtokuormiin. Kaikkia koekohteen injektointimenetelmiä voidaan pitää toimivina.

Muutaman paalun kohdalla kallionpinta oli vino. Tästä johtuen tarkan poraussyvyyden määrittäminen ei ollut yksiselitteistä. Tartuntalujuuden ominaisarvot on laskettu todellisia poraussyvyyskäyttäen. Näin ollen virhe poraussyvyyden määrittämisessä vaikuttaa tartuntalujuuden arvoon. Erityisesti tämä korostuu 1 m kallioon porattujen paalujen kohdalla, sillä 20 cm virhe poraussyvyyden määrittämisessä tarkoittaa noin 20 % virhettä tartuntalujuudessa.

## 9 Vaipaltaan injektoidun porapaalun käyttökelpoisuus

### 9.1 Haasteet

#### 9.1.1 Porausvaihe

Paalun ja kallion välisen injektoinnin onnistumiseen vaikuttavat avarrinkruunun aikaansaaman paaluputken ja kallion välisen raon koko sekä raon täyttyminen porasojalla ja maa-aineksella. Porauksen yhteydessä muodostuvan porasoijan rakeisuus vaikuttaa oleellisesti raon täyttymiseen. Porauskalusto taas vaikuttaa muodostuvan porasoijan rakeisuuteen. Kun porauksessa käytetään keskistä siipiavarrinkruunua, porasoija on huomattavasti karkearakeisempaa kuin rengasteräavarrinkruunulla porattaessa. Mikäli avarrinkruunussa on hahloja tai rakoja, muodostuva porasoija on hyvin hienojakoista. Myös kallion laatu, kivilaji sekä minerologia vaikuttavat porasoijan koostumukseen. (Miettinen 2014)

Porausvaiheessa osa porasojasta poistuu paaluputken sisäpuolelta ja osa ulkopuolelta. Kokemusten perusteella muutaman ensimmäisen porausmetrin aikana porasoija poistuu paalun ulkovaippaa pitkin ja tämän jälkeen lähes kaikki porasoija poistuu paalun sisäkautta. Tämä johtuu siitä, että porasoija tiivistyy ja pakkautuu muutaman metrin porauksen jälkeen. Osa porauksessa käytettävästä paineilmasta ohjautuu paaluputken ulkopuolelle, jonka vaikutuksesta myös osa porasojasta ohjautuu kallion ja paaluputken väliin. Porakruunun tyyppi vaikuttaa paineilman ohjautumiseen.

Kalliopinnan yläpuolisten maakerrosten ominaisuudet vaikuttavat paaluputken ja kallion välisen raon täyttymiseen. Löyhä, hienorakeinen ja vetinen maa-aines valuu raon todennäköisemmin kuin kiinteä ja karkearakeinen maa-aines.

#### 9.1.2 Huuhteluvaihe

Paalun huuhteluvaiheessa kallion ja paaluputken välinen rako pyritään saamaan puhtaaksi porasojasta sekä maa-aineksesta. Paaluputken ja kallion välisen raon saaminen puhtaaksi on injektoinnin onnistumisen kannalta erittäin tärkeää. Väli voidaan huuhdella vesipaineen avulla. Se, miten vesi kulkee raossa, vaikuttaa oleellisesti raon puhdistumiseen. Vesi muodostaa itselleen joko pienen, kapean reitin, jolloin suurin osa porasojasta ja maa-aineksesta jää rakoon tai sitten suuremman reitin, jolloin suurin osa porasojasta ja maa-aineksesta poistuu ja rako puhdistuu. Käytettävä vesipaine sekä vesimenekki vaikuttavat raon puhdistumiseen. Tarvittavan vesipaineen tulee olla ehjässä kalliossa porattaessa vallitsevaa pohjavedenpainetta suurempi. Injektoinnin onnistumisen kannalta on tärkeää myös se, ettei paalu täyty huuhtelun jälkeen hienoaineksesta. Tämän välttämiseksi paalu on syytä jättää täyteen vettä huuhtelun jälkeen, ja injektointi tulee suorittaa heti huuhtelun päätyttyä.

### 9.1.3 Injektointivaihe

#### Injektointimassa

Injektointimassaa ja vesi-sementtisuhdetta valittaessa tulee huomioida käyttökohteen ominaispiirteet. Massan valmistuksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota siihen, että suunniteltu w/c-suhde toteutuu, ja massasta tulee näin ollen tasalaatuista. Liian suuri w/c-suhde heikentää injektointimassan lujuutta merkittävästi. Liian pieni w/c-suhde taas heikentää injektointimassan tasaista levittymistä kalliorakoon. Injektointilaastin maksimiraekoko tulee valita injektointimenetelmään soveltuvaksi. Injektointimassaa valmistettaessa on huomioitava myös injektointilaastin maahantuojan ohjeistus massan valmistukselle. Käytettävästä massasta tulee valmistaa koekappaleita, joista määritetään puristuslujuuskokeilla massan puristuslujuus. Näin voidaan varmistua, että massa vastaa suunniteltua.

Teoreettinen injektointimassan menekki tulee laskea ja todellinen massamenekki arvioida ennen työn aloittamista. Koekohteen perusteella riittävä injektointiaineen määrä on  $3 \times$  paaluputken ja kallion välinen teoreettinen tilavuus. Massamäärää arvioitaessa on lisäksi huomioitava paalun sisään jäävä massa. Injektointimassan menekin seuranta tulee suorittaa 5 l tarkkuudella, mieluiten virtausmittarilla.

Injektointiaineen takaisinvirtaus paaluputkeen tulee estää. Takaisinvirtaus voidaan estää täyttämällä paaluputkea injektointimassalla pohjavedenpinnan tasolle saakka. Näin ollen paaluputken sisä- ja ulkopuolen välille ei synny paine-eroa, joka työntäisi injektointimassan kallioraosta paalun sisään. Yleensä porapaalut betonoidaan ja raudoitetaan ( $d > 273 \text{ mm}$ ), mikä tuo haastetta paalun täyttämiseen mansetilla injektoinnin aikana sekä heti injektoinnin päättymisen jälkeen. Betoni voidaan korvata pohjavedenpinnan tasolle saakka injektointiaineella. Paalujen raudoittaminen on kuitenkin haasteellista, mikäli paalun sisäosaa täytetään injektointimassalla injektoinnin yhteydessä.

#### Injektointipaine

Tarvittava injektointipaine riippuu oleellisesti kallion ja paaluputken välisen raon puhtaudesta. Mikäli rako onnistutaan puhdistamaan hyvin jo huuhteluvaiheessa, on tarvittava injektointipaine vain hieman vallitsevaa pohjavedenpainetta suurempi. Injektointiin riittää siis käytännössä se, että rako saadaan täytettyä injektointiaineella. Kun rako on täytynyt injektointimassalla, injektointipaine voi alkaa kasvamaan. Tämä johtuu siitä, että kallion päällä oleva maa-aines pyrkii vastustamaan injektointimassan virtausta. Toisaalta jos maakerrosten paksuus on vain muutamia metrejä, saattaa injektointimassa purkautua paaluputken ulkopintaa pitkin maanpinnalle. Tällöin injektointipaine ei nouse kallioreiän täyttymisenkään jälkeen. Toisaalta mikäli pohjamaan vedenläpäisevyys on kovin pieni, ei kallioraosta poistuva vesi pääse vapaasti purkautumaan injektointimassan edellä. Tällöin injektointipaine voi alkaa kasvamaan.

Mikäli kallion ja paaluputken välistä rako ei onnistuta puhdistamaan vesihuuhtelun yhteydessä tai se pääsee täyttymään porasoihasta tai maa-aineksesta huuhtelun jälkeen uudelleen, voi tarvittava injektointipaine nousta suuremmaksi. Kallion ja paaluputken välisen raon puhtautta ei pystytä todentamaan mitenkään. Jos injektointipaine pienenee kuitenkin injektoinnin aikana, voi se olla merkki siitä, että injektointimassa on syrjäyttänyt raossa olevan porasoihan ja maa-aineksen kalliopinnan tasolle saakka. Injektointipaineen pieneneminen voi toisaalta olla merkki siitäkin, että injektointimassa valuu kalliossa olevaan rako. Injektoinnin lopetuspaineelle tulee asettaa

maksimiarvo ennen injektointityön aloittamista. Injektointipainetta tulee seurata injektointityön aikana. Seuranta tulee tehdä painemittarilla mahdollisimman lähellä injektointikohtaa.

## 9.2 Ehdotetut vaatimukset suunnittelulle, toteutukselle ja laadunvalvonnalle

Menetelmää käytettäessä injektointimassan laatu tulee varmistaa. Massan w/c-suhde tulee valita tuotevalmistajan ohjeistuksen mukaisesti. Käytettäessä pakkaslaastia veden oikeaan lämpötilaan tulee kiinnittää erityistä huomiota. Massan tulee olla paisuvaa massaa. Massan maksimiraekoko tulee valita injektointimenetelmä sekä kallioraon leveys huomioiden siten, ettei maksimiraekoko ole liian suuri suhteessa injektointireikään/-uraan tai kallioraon kokoon.

Injektointimenetelmänä tulee käyttää joko mansetti-injektointia, kaksoismansetti-injektointia tai injektointia maakengän kautta. Injektointiaineen määrän tulee olla 3-kertainen kallioraon teoreettiseen tilavuuteen nähden.

Injektointiaineen takaisinvirtaus paaluputkeen tulee estää. Takaisinvirtaus voidaan estää täyttämällä paaluputkea injektointimassalla pohjavedenpinnan tasolle saakka.

Vesihuuhtelu tulee suorittaa ennen injektointia. Kun vesihuuhtelu on tehty, paaluun tulee jättää vettä vähintään pohjavedenpinnan tasolle. Näin vähennetään riskiä, että kalliorako täyttyy maa-aineksella.

Kohteen kalliooperän on oltava ehjää. Ehjyys tulee todentaa riittävällä määrällä porakonekairauksia ja tarvittaessa vesimenekkikokeilla. Avarrinkruunutyypin tulee käyttää rengasteräsestimallia, koska sillä saavutetaan huomattavasti irtorengasmallia suurempi maksimikuorman arvo.

Menetelmää käytettäessä teräksen ja laastin välisen tartuntalujuuden ominaisarvona voidaan käyttää enintään 100 kPa. Minimiporaussyvyys kallioon on 2 m, kuitenkin vähintään 3 x paalun ulkohalkaisija. Vetokuormitus voi esiintyä vain muuttuvilla kuormilla, ja vetokuorman ominaisarvo ei saa olla taulukossa 27 esitettyä suurempi.

*Taulukko 27 Vetokuorman ominaisarvo paalun halkaisijan mukaan.*

Paalun halkaisija [mm]	Vetokuorman ominaisarvo [kN]
> 170	≤ 50
> 320	≤ 100
> 500	≤ 150
> 800	≤ 250

Kun vetokuormitukselle mitoitettut paalut koekuormitetaan, määritetään vetokestävyyden mitoitusarvo Paalutusohjeen (2011) mukaisesti. Mitoitusvaiheessa ei kuitenkaan tässä tapauksessa suositella käytettäväksi teräs-laasti-tartunnan ominaisarvona suurempaa kuin 100 kPa.

## 10 Johtopäätökset

Tämän diplomityön päätavoitteena on ollut selvittää kallioon vaipaltaan injektoidun porapaalun käyttökelpoisuutta vetokuormien vastaanottamiseen. Lisäksi tavoitteena on ollut yhtenäistää porapaalun kallioankkuroinnin toteutuskäytäntöjä sekä antaa perusteita kyseisen rakenteen mitoittamiselle. Kallioon vaipaltaan injektoidun porapaalun käytettävyyttä selvitettiin koekuormitusten perusteella. Porapaalujen kallioankkuroinnissa käytettyjä toteutustapoja selvitettiin toteutettujen kohteiden suunnitelmien pohjalta sekä haastattelututkimuksella.

Koekohteen tulosten perusteella vaipaltaan injektoitua porapaalua voidaan käyttää vetokuormien vastaanottamiseen. Koekohteen murtokuormista määritetty vetokestävyyden mitoitusarvo on 115 kN. Vetokuorman ominaisarvo on siis rajoitettava kyseistä menetelmää käytettäessä maltilliseksi. Seuraavassa taulukossa (28) on esitetty suositukset vetokuorman ominaisarvolle paalun halkaisijan mukaan, kun poraussyvyys kallioon on vähintään 2 m. Mikäli paalut koekuormitetaan, voidaan vetokuorman ominaisarvoa kasvattaa koekuormitettujen paalujen lukumäärän mukaan.

*Taulukko 28 Ehdotetut vaatimukset vetokuorman ominaisarvolle.*

Paalun halkaisija [mm]	Vetokuorman ominaisarvo [kN]
> 170	≤ 50
> 320	≤ 100
> 500	≤ 150
> 800	≤ 250

Nykyisen ohjeistuksen mukaan kallioon injektoidun porapaalun vetokestävyyttä rajoittaa ensin kalliokartion paino, sitten kallio-laasti-tartunnan kestävyys ja sitten teräs-laasti-tartunnan kestävyys. Koekohteen havaintojen perusteella vetokestävyyttä rajoittaa kuitenkin paaluputken ja injektointiaineen välisen teräs-laasti-tartunnan kestävyys. Tämä johtunee siitä, että injektointivaiheessa paaluputken pinta on epäpuhtas, mikä pienentää tartunnan lujuutta merkittävästi. Toinen mahdollinen syy alhaiseen teräs-laasti-tartunnan lujuuteen on se, ettei injektointiaine ole levinnyt kallioraossa kauttaaltaan paalun kehälle. Näin ollen todellinen teräs-laasti-tartuntapinta-ala voi siis olla merkittävästi pienempi kuin teoreettinen tartuntapinta-ala. Teräs-laasti-tartunnan ominaisarvo tuleekin rajoittaa kyseistä menetelmää käytettäessä enintään 100 kPa. Kalliokartio voidaan jättää mitoituksessa huomiotta, mikäli kallion laatu on todettu ehjäksi riittävän porakonekairauksin.

Rakenteen pitkäaikaiskestävyyden kannalta paaluputken korroosio tulee estää. Nykyinen ohjeistus ei ota kantaa riittävän suojakerrospaksuuden suuruudesta kallio-osuudella. Kallio-osuudella vähimmäispaksuudeksi voisi asettaa 10 mm, joka perustuu ankureita käsittelevän standardin SFS-EN 1537 vaatimukseen. Avarrinkruunun koko tulee valita siten, että vaatimus täyttyy. Avarrinkruunun tyyppinä tulee käyttää rengasteräsettimallia, koska sillä saavutetaan mekaaninen tartunta teräksen ja laastin välille. Rengasteräsettimallin käyttö lisää rakenteen turvallisuutta, sillä koekohteen perusteella rengasteräsettimallilla saavutetaan huomattavasti suuremmat maksimikuorman arvot kuin irtorengasmallilla, ja lisäksi rengasteräsettimallilla murto-mekanismi on sitkeä.

Koekohteessa käytettiin 4 eri injektointimenetelmää. Tulosten perusteella injektointimenetelmien välillä ei ollut juurikaan eroja. '1-tasolta toteutettu mansetti-injektointi' sekä 'injektointi maakengän kautta' osoittautuivat kuitenkin käytetyistä menetelmistä suositeltavimmiksi sekä saatujen mittaustulosten että menetelmien yksinkertaisen toteutettavuuden vuoksi. Mikäli injektointimenetelmänä käytetään tässä työssä esitellyistä poikkeavaa menetelmää, tulee injektointireikien/-urien määrän ja koon vastata vähintään mansetti-injektointia. Työn puitteissa on ollut myös tarkoitus selvittää kallioon injektoidun porapaalun alapään kiertojäykkyyttä. Kaikkia neljää koekohteella käytettyä injektointimenetelmää voidaan suositella käytettäväksi, kun porapaalun ja kallion välisestä liitoksesta tehdään momenttijäykkä.

Kustannustarkastelun perusteella kallioon vaipaltaan injektoitu porapaalu osoittautuu erillisellä ankkurilla ankkuroitua porapaalua edullisemmaksi ratkaisuksi, kun vetojännitykset ovat pieniä. Menetelmän kustannustehokkuus korostuu pienpaalujen kokoluokassa sekä poraussyvyyden kasvaessa. Tarkastellun RD220-paalun osalta kustannusero oli poraussyvyydestä riippuen 20–25 %, kun taas RD800-paalun osalta menetelmät osoittautuivat kustannuksiltaan liki samansuuruisiksi.

Työn tarkoituksena on ollut tuoda esiin porapaalujen kallioankkuroinnissa käytettyjä toteutustapoja sekä suosituksia menetelmän toteuttamisesta jatkossa. Nykyisen ohjeistuksen mukainen kalliokartion huomioonottaminen johtaa pitkiin ankkurointipituuksiin. Laskennallisten tarkastelujen perusteella kalliokartion päällä olevien maakerrosten huomioiminen kalliokartion painossa lisää ankkuroidun porapaalun vetokestävyyttä huomattavasti, etenkin lyhyillä (< 3m) poraussyvyyksillä. Kalliokartion kärkikulmana voitaneen suositella käytettävän 90° ehjäksi pohjatutkimuksin todetussa kalliossa. Suunnitelmissa tulisi esittää kallioreiän halkaisijan koko. Tällä varmistetaan osaltaan ankkurin peitepaksuusvaatimuksen (10 mm) täyttyminen. Ankkurin suojaputken poraussyvyys tulisi ohjeistaa suunnitelmissa. Minimiporaussyvyyttenä voidaan pitää 0,5 m.

Koekohteella mitattujen tulosten perusteella vaipaltaan injektoidun porapaalun vetokestävyyttä rajoittaa siis teräs-laasti-tartunnan kestävyys. Tämän perusteella mekaanisen tartunnan lisääminen paaluputken ulkopintaan kallio-osuudella voisi parantaa teräs-laasti-tartunnan kestävyyttä merkittävästi. Jatkotutkimuksena tälle työlle asiaa olisi syytä selvittää. Jatkotutkimuksena tulisi selvittää, mikä on riittävä tartunnan määrä ja onko paalun ulkopintaan lisättävällä materiaalilla haitallista vaikutusta porausuoritukseen tai kallioraon puhdistumiseen. Vaipaltaan injektoidulla ja ankkuroidulla porapaalulla on hyvin todennäköisesti mahdollista vastaanottaa vähintäänkin 2–3-kertaisia vetokuormia nyt saavutettuihin kuormiin nähden.

## Lähteet

Ahonen, J. 2014. PPV Finland. Henkilökohtainen haastattelu 8.8.2014.

Akfidan & Sadek. 2012. Dimensionering och utförande av bottenplattor utsatta för uppträck. Examensarbete. Stockholm. Kungliga Tekniska Högskolan. 99 s.

Borgenström, A. 2014. Robit Rocktools. Henkilökohtainen sähköpostiviesti. 17.11.2014.

FHWA-IF-99-015. 1999. Geotechnical Engineering Circular No. 4, Ground Anchors and Anchored Systems. U.S. Department of Transportation. Atlanta, Georgia. 185 s.

Grouting of rock masses. 2003. Invited key note lecture by Giovanni Lombardi Dr Eng. PhD h.c. Minusio, Sveitsi. 42 s.

Gylling, Kai. 2014. R&D Manager, Oy Atlas Copco Rotex Ab. Henkilökohtaiset sähköpostiviestit 6.10.2014, 7.10.2014 ja 9.10.2014 (1).

Gylling, Kai. 2014. R&D Manager, Oy Atlas Copco Rotex Ab. Henkilökohtainen haastattelu 9.10.2014 (2).

Heikinheimo, R. 2014. Projektipäällikkö (geotekniikka), Ramboll Finland Oy. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 9.6.2014.

Holopainen, P. 1977. Kallion tiivistäminen injektioimalla. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 31. 76 s.

Inkerö, M. 2014. Työpäällikkö (porapaalutukset), Styrod Boreal Oy. Puhelinkeskustelu. 11.6.2014.

Laitinen, P. 2014. RE: Kallioon ankkuroidut porapaalut / Siltakohde VT 19. Henkilökohtaiset sähköpostiviestit 18.6.2014 ja 19.6.2014.

Lehmusvirta, O. 2006. Pora- ja puristuspaalujen kuormansiirtorakenteet. Insinööritoimisto. Helsinki. Helsingin ammattikorkeakoulu. 49 s.

Leino, R. 2014. Henkilökohtainen sähköpostiviesti. 5.11.2014

Liikenneviraston ohjeita 12/2011. 2011. Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki, Liikennevirasto. 70 s.

Liikenneviraston ohjeita 13/2011. 2011. Pohjavesitilanteen tarkastelu alikulkusiltapaikoilla. Helsinki, Liikennevirasto. 101 s.

Liikenneviraston ohjeita 11/2012. 2012. Sillan geotekninen suunnittelu. Sillat ja muut taitorakenteet. Helsinki, Liikennevirasto. 49 s.

Mansikkamäki, Perälä, Uotinen. 2014. Keskustelu diplomityökokouksessa 16.5.2014. Helsinki.



Mansikkamäki, J. 2014. DI, projektipäällikkö (geotekniikka), Ramboll Finland Oy. Lausunto 1 diplomityöpalaverissa 27.6.2014. Tampere.

Mansikkamäki, J. 2014. DI, projektipäällikkö (geotekniikka), Ramboll Finland Oy. Lausunto 2 diplomityöpalaverissa 27.6.2014. Tampere.

Miettinen, L-V. 2014. The rotational stiffness and watertightness of RD pile walls in the bedrock and pile interface. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 96 s.

NGF-kurs 84725110. 2008. Spunt og avstivede byggegrøper. Norsk geoteknisk forening. 17 s.

Norsk Geoteknisk Forening – Den Norske Pelekomité. 2012. Peleveiledningen 2012. 315 s.

Parkkonen, I. 2012. Injektointimassan kehittäminen aa-tiivysluokan tunnelialueille. Opinnäytetyö. Joensuu. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. 33 s.

Patrikainen, P. 1983. Suomen kivilajien merkittävimmät materiaaliominaisuudet ydinjätteen loppusijoituksen kannalta. Geologinen tutkimuslaitos, Ydinjätteiden sijoitus-tutkimusten projektiryhmä, tiedonanto 25 G – 1,5. 35 s.

Pentti, M. 2011. Luento 19.1.2011. RTEK-3110 Rakennesuunnittelun perusteet, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentokalvot. 49 s.

Perälä, A. 2014. Suunnitelmakokoelma / Raahen tuulivoimapuisto. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 30.5.2014.

prEN ISO 22477-5. 2014. Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 5: Testing of pre-stressed anchors. 77 s.

Pålkommissionen. Rapport 97. 2000. Stålkärnepålar. Anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll. Linköping. 56 s.

Pålkommissionen. Rapport 104. 2010. Borrade stålrörspålar. Anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll. Linköping. 47 s.

Pöyry. 2010. Tuulivoimayrittäjyys Oulunkaarella: Tuulivoimaprojektin vaiheiden kuvaus. Loppuraportti. Esityskalvot 16.12.2010. 64 s.

Ramboll Finland Oy. 2012. Suunnitelmakokoelma / Sirkkalan silta, Joensuu.

RIL 98. 1976. Maa- ja kalliorakennus. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 297 s.

RIL 154-2-1987. 1987. Tunneli- ja kalliorakennus II. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 437 s.

RIL 230-2007. 2007. Pienpaalutusohje PPO-2007. Teräksiset lyönti-, pora- ja puristuspaalut. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 226 s.

RIL 254-1-2011. 2011. Paalutusohje 2011. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 261 s.

RIL 263-2014. 2014. Kaivanto-ohje. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 208 s.

Rämö, S. 2014. Toimitusjohtaja Seppo Rämö, Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 13.6.2014.

Satola, I. 2014. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 18.11.2014.

Savolainen, M. 2013. Injektoitavat teräspalkkipaalut – Erityisaiheena porattavat C-paalut. Opinnäytetyö (YAMK). Turku. Turun ammattikorkeakoulu. 63 s.

Savonen, A. 2007. Kalliorakennustyömaiden toteumatietojen keruujärjestelmä. Opinnäytetyö. Tampere. Tampereen ammattikorkeakoulu. 26 s.

SFS-EN 1997-1. 2006. Eurokoodi 7. Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS. 147 s.

SFS-EN ISO 22282-3. 2012. Geohydraulic testing – Part 3: Water pressure tests in rock. 25 s.

SFS-EN 14199. 2005. Pohjarakennustyöt, Pienpaalut. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 45 s.

SFS-EN 1537. 2013. Execution of special geotechnical works. Ground anchors. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 52 s.

SFS-EN 1993. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu, osa 5 Paalut. Suomen standardoimisliitto SFS. 88 s.

SSAB. 2015. SSAB:n teräspaalut. Suunnittelu- ja asennusohjeet. [WWW]. [Viitattu 2.3.2015]. Saatavissa: [www.ruukki.fi](http://www.ruukki.fi)

Sunell, J. 2015. Re: Kivilajin tunnistus / sijaintitieto. Henkilökohtainen sähköpostiviesti. 19.1.2015.

Suomen Betoniyhdistys r.y. 2006. Kalliotilojen injektointi, by 53. Helsinki. Nykypaino Oy. 61 s.

ThyssenKrupp Bautechnik. 2013. Anchor equipment, Product range. Safety in construction. Essen. 30 s.

TIEH2000002-001. 2001. Porapaalutusohje. Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus. Helsinki, Tiehallinto. Edita Oyj. 95 s.

TK Geo 11. 2011. TRV Geo, Travikverkets tekniska krav för geokonstruktioner. Borlänge. Trafikverket. 167 s.

Uotinen, V-M. 2014. VS: Haastattelututkimus kallioon injektoiduista ja ankkuroiduista porapaaluista. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 13.6.2014.

Uotinen, V-M. 2014. Fwd: VS: VS: Kuokkalankosken ratasilta. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 2.9.2014.

Uotinen, V-M. 2015. Kommentti diplomityöhön. 13.2.2015.

Viitala, J. 2013. Porapaalutuksen käyttö perustusten vahvistamisessa. Porapaalutuksen työmaatekniikat. RAK-23530, Perustusten vahvistaminen, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentokalvot. 42 s.

Vunneli, J. 2014. Työpäällikkö, YIT Rakennus Oy. Henkilökohtainen haastattelu 25.6.2014. Helsinki.



# Injektointipöytäkirja

	<b>Paikka</b>	Ylivieska	Ylivieska	Ylivieska
	<b>Aika</b>	20.11.2014	20.11.2014	20.11.2014
	<b>Ilman lämpötila</b>	- 2°C	- 2°C	- 2°C
	<b>Injektointimassa</b>	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF
	<b>Injektointimassan w/c -suhde</b>	0,4	0,4	0,4
	<b>Paalun numero</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	<b>Injektointimenetelmä</b>	Injektoitava kenkä	Mansetti-injektointi	Injektoitava kenkä
	<b>Porausvyvyys</b>	1,8m	1,0m	1,0m
<b>HUUHTELU</b>	Mansetin korkeustaso	5,8	5,8	5,8
	Vesihuhtelun määrä, litraa	200	200	200
	Vesihuhtelun paine, bar	1	-	-
	Vesihuhtelun paine, bar	< 1	-	-
	Mansetin korkeustaso	5,9	5,9	5,9
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	160	40	40
<b>vaihe 1</b>	Arvioitu määrä, litraa	-	-	-
	Injektointipaine, bar	0	-	1
	Injektointipaine, bar	1	-	< 1
	Lopetusaine, bar	< 1	< 1	< 1
	Mansetin korkeustaso	5,9 --> 4,2	5,8 --> 5,0	5,9 --> 5,0
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	80	40	40
<b>vaihe 2</b>	Arvioitu määrä	236	71	71
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
	Mansetin korkeustaso			
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa			
<b>vaihe 3</b>	Arvioitu määrä			
	Injektointipaine, bar			
	Injektointipaine, bar			
	Lopetusaine, bar			
	Mansetin korkeustaso			
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa			
<b>vaihe 4</b>	Arvioitu määrä			
	Injektointipaine, bar			
	Injektointipaine, bar			
	Lopetusaine, bar			
	<b>Injektointiaineen määrä yhteensä, litraa</b>	<b>240</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
	Arvioitu injektointiaineen määrä yhteensä, litraa	236	71	71

	<b>Paikka</b>	Ylivieska	Ylivieska	Ylivieska
	<b>Aika</b>	20.11.2014	20.11.2014	21.11.2014
	<b>Ilman lämpötila</b>	- 2 °C	- 2 °C	- 3 °C
	<b>Injektointimassa</b>	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF
	<b>Injektointimassan w/c -suhde</b>	0,4	0,4	0,4
	<b>Paalun numero</b>	4	5	6
	<b>Injektointimenetelmä</b>	Mansetti-injektointi	Mansetti-injektointi	2-Mansetti-injektointi
	<b>Porausvyvyys</b>	1,8m	1,8m	2,0m
<b>HUUHTELU</b>	Mansetin korkeustaso	5,3	5,8	6,0
	Vesihuhtelun määrä, litraa	200	200	200
	Vesihuhtelun paine, bar	1,5	1,5	-
	Vesihuhtelun paine, bar	1	1	-
	Mansetin korkeustaso	5,9 --> 5,3	6,0 --> 5,3	5,9
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	32	32	64
<b>vaihe 1</b>	Arvioitu määrä, litraa	-	-	134
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
	Mansetin korkeustaso	5,3	5,3	5,9 --> 4,9
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	96	96	48
<b>vaihe 2</b>	Arvioitu määrä	118	118	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
	Mansetin korkeustaso	5,3 --> 4,2	5,3 --> 4,2	4,9
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	48	48	150
<b>vaihe 3</b>	Arvioitu määrä	-	-	128
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
	Mansetin korkeustaso	4,2	4,2	
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	48	48	
<b>vaihe 4</b>	Arvioitu määrä	117	117	
	Injektointipaine, bar	-	-	
	Injektointipaine, bar	-	-	
	Lopetusaine, bar	-	-	
	<b>Injektointiaineen määrä yhteensä, litraa</b>	<b>224</b>	<b>224</b>	<b>262</b>
	Arvioitu injektointiaineen määrä yhteensä, litraa	236	236	262

	<b>Paikka</b>	Ylivieska	Ylivieska	Ylivieska
	<b>Aika</b>	21.11.2014	21.11.2014	20.11.2015
	<b>Ilman lämpötila</b>	- 3 °C	- 3 °C	- 2 °C
	<b>Injektointimassa</b>	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF
	<b>Injektointimassan w/c -suhde</b>	0,4	0,4	0,4
	<b>Paalun numero</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
	<b>Injektointimenetelmä</b>	2-Mansetti-injektointi	2-Mansetti-injektointi	Mansetti-injektointi
	<b>Porausvyvyys</b>	2,0m	2,0m	1,0m
<b>HUUHTELU</b>	Mansetin korkeustaso	6,0	6,0	5,8
	Vesihuuhtelun määrä, litraa	200	200	200
	Vesihuuhtelun paine, bar	-	-	-
	Vesihuuhtelun paine, bar	-	-	-
<b>INJEKTOINTI vaihe 1</b>	Mansetin korkeustaso	5,9	5,9	5,8
	Injektointiaineen määrä, litraa	64	64	55
	Arvioitu määrä, litraa	134	134	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
<b>INJEKTOINTI vaihe 2</b>	Mansetin korkeustaso	5,9 --> 4,9	5,9 --> 4,9	5,8 --> 4,8
	Injektointiaineen määrä, litraa	48	48	40
	Arvioitu määrä	-	-	88
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
<b>INJEKTOINTI vaihe 3</b>	Mansetin korkeustaso	4,9	4,9	
	Injektointiaineen määrä, litraa	150	150	
	Arvioitu määrä	128	128	
	Injektointipaine, bar	-	-	
	Injektointipaine, bar	-	-	
	Lopetusaine, bar	-	-	
<b>INJEKTOINTI vaihe 4</b>	Mansetin korkeustaso			
	Injektointiaineen määrä, litraa			
	Arvioitu määrä			
	Injektointipaine, bar			
	Injektointipaine, bar			
	Lopetusaine, bar			
	<b>Injektointiaineen määrä yhteensä, litraa</b>	<b>262</b>	<b>262</b>	<b>95</b>
	Arvioitu injektointiaineen määrä yhteensä, litraa	262	262	88

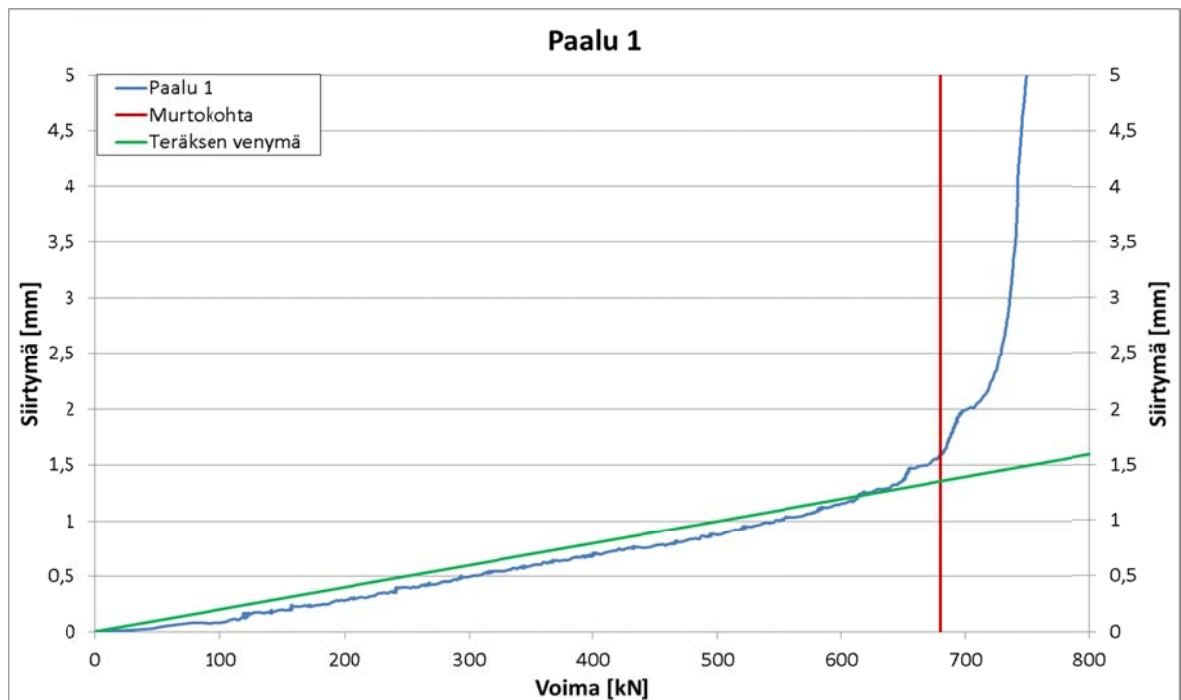
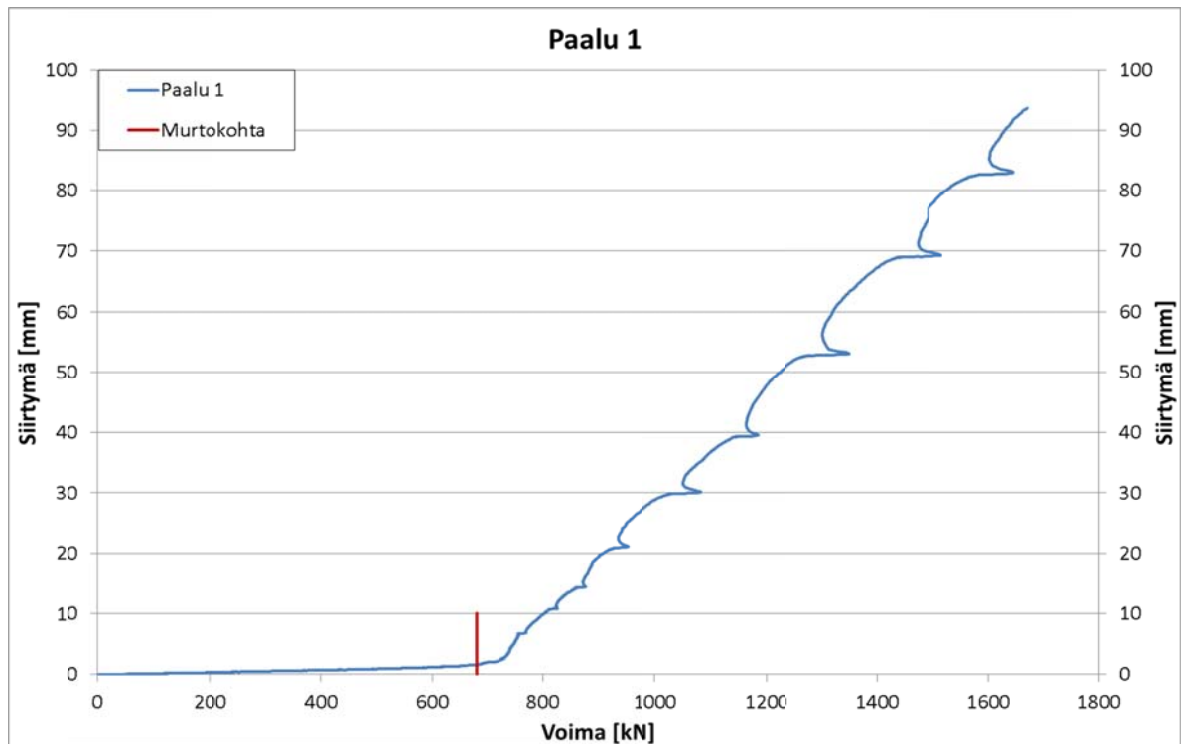
	<b>Paikka</b>	Ylivieska	Ylivieska	Ylivieska
	<b>Aika</b>	20.11.2015	20.11.2015	20.11.2015
	<b>Ilman lämpötila</b>	- 2 °C	- 2 °C	- 2 °C
	<b>Injektointimassa</b>	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF
	<b>Injektointimassan w/c -suhde</b>	0.4	0.4	0.4
	<b>Paalun numero</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
	<b>Injektointimenetelmä</b>	Injektoitava kenkä	Mansetti-injektointi	Mansetti-injektointi
	<b>Porausvyvyys</b>	1,0m	1,8m	1,8m
<b>HUUHTELU</b>	Mansetin korkeustaso	5,8	4,9	5,8
	Vesihuhtelun määrä, litraa	200	200	250
	Vesihuhtelun paine, bar	1,0	1,2	-
	Vesihuhtelun paine, bar	< 1	< 1	-
	Mansetin korkeustaso	5,9	6,0 --> 5,3	5,8
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	55	32	96
<b>vaihe 1</b>	Arvioitu määrä, litraa	-	-	158
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
	Mansetin korkeustaso	5,8 --> 4,8	5,3	
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	40	64	
<b>vaihe 2</b>	Arvioitu määrä	88	67	
	Injektointipaine, bar	-	-	
	Injektointipaine, bar	-	-	
	Lopetusaine, bar	-	-	
	Mansetin korkeustaso		5,3 --> 4,2	
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa		64	
<b>vaihe 3</b>	Arvioitu määrä		-	
	Injektointipaine, bar		-	
	Injektointipaine, bar		-	
	Lopetusaine, bar		-	
	Mansetin korkeustaso		4,2	
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa		32	
<b>vaihe 4</b>	Arvioitu määrä		91	
	Injektointipaine, bar		-	
	Injektointipaine, bar		-	
	Lopetusaine, bar		-	
	<b>Injektointiaineen määrä yhteensä, litraa</b>	<b>95</b>	<b>192</b>	<b>96</b>
	Arvioitu injektointiaineen määrä yhteensä, litraa	88	158	158

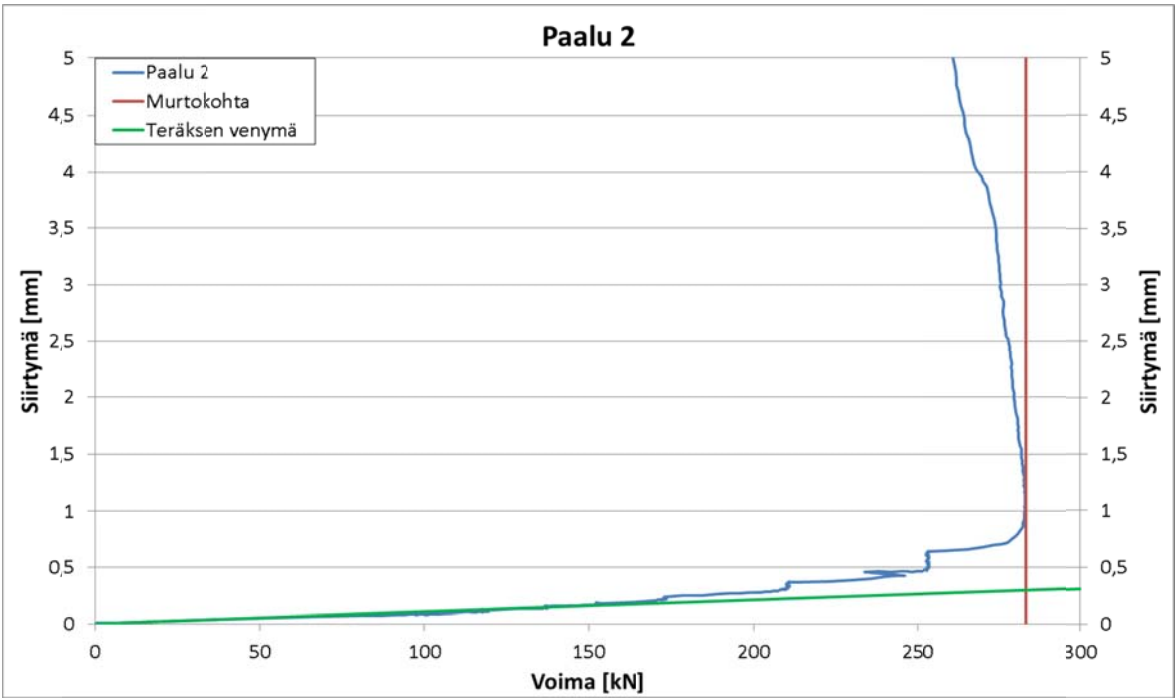
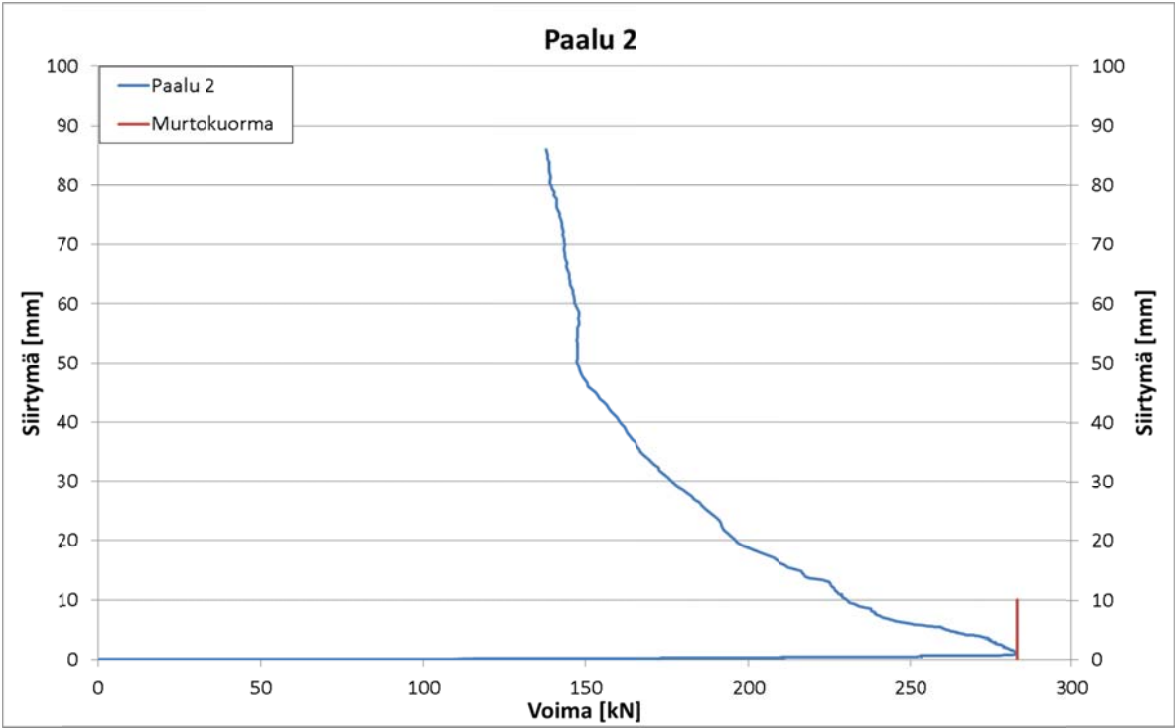


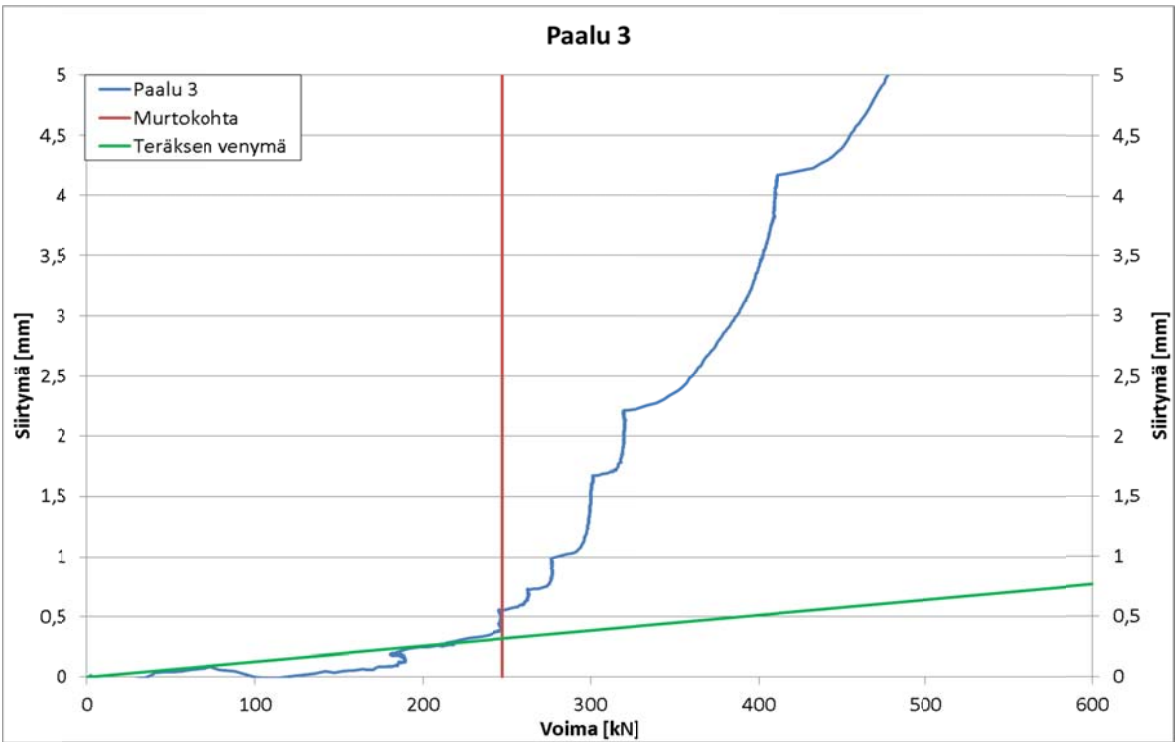
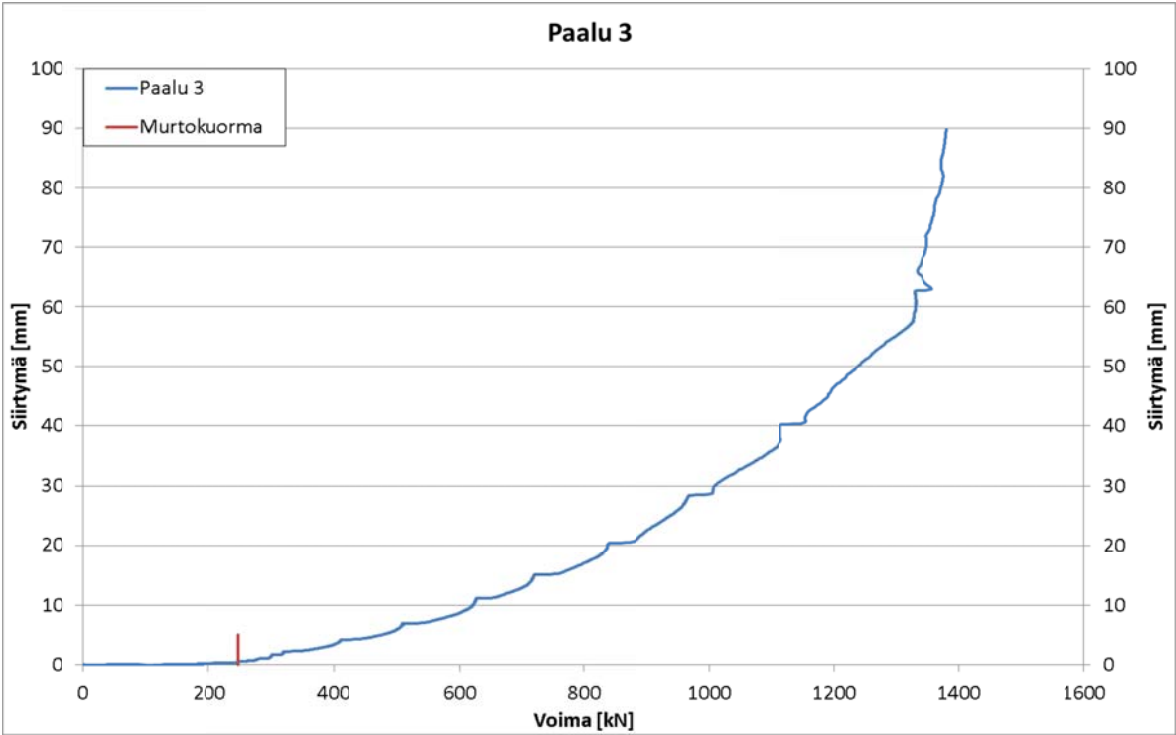
	<b>Paikka</b>	Ylivieska	Ylivieska	Ylivieska
	<b>Aika</b>	21.11.2014	21.11.2014	21.11.2014
	<b>Ilman lämpötila</b>	- 3°C	- 3°C	- 3°C
	<b>Injektointimassa</b>	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF	Nonset 50 / 50 FF
	<b>Injektointimassan w/c -suhde</b>	0,4	0,4	0,4
	<b>Paalun numero</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
	<b>Injektointimenetelmä</b>	Injektoitava kenkä	Injektoitava kenkä	Mansetti-injektointi
	<b>Porausvyvyys</b>	1,8m	1,8m	1,8m
<b>HUUHTELU</b>	Mansetin korkeustaso	5,9	5,9	5,8
	Vesihuhtelun määrä, litraa	200	200	200
	Vesihuhtelun paine, bar	0 --> 1	0 --> 1	-
	Vesihuhtelun paine, bar	0	< 1	-
	Mansetin korkeustaso	5,9	5,9	5,9 --> 5,4
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	80	80	32
<b>vaihe 1</b>	Arvioitu määrä, litraa	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
	Mansetin korkeustaso	5,9 --> 5,0	5,9 --> 5,0	5,4
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa	80	80	48
<b>vaihe 2</b>	Arvioitu määrä	158	158	46
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Injektointipaine, bar	-	-	-
	Lopetusaine, bar	-	-	-
	Mansetin korkeustaso			5,4 --> 4,2
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa			48
<b>vaihe 3</b>	Arvioitu määrä			-
	Injektointipaine, bar			-
	Injektointipaine, bar			-
	Lopetusaine, bar			-
	Mansetin korkeustaso			4,2
<b>INJEKTOINTI</b>	Injektointiaineen määrä, litraa			32
<b>vaihe 4</b>	Arvioitu määrä			81
	Injektointipaine, bar			-
	Injektointipaine, bar			-
	Lopetusaine, bar			-
	<b>Injektointiaineen määrä yhteensä, litraa</b>	<b>160</b>	<b>160</b>	<b>160</b>
	Arvioitu injektointiaineen määrä yhteensä, litraa	158	158	128

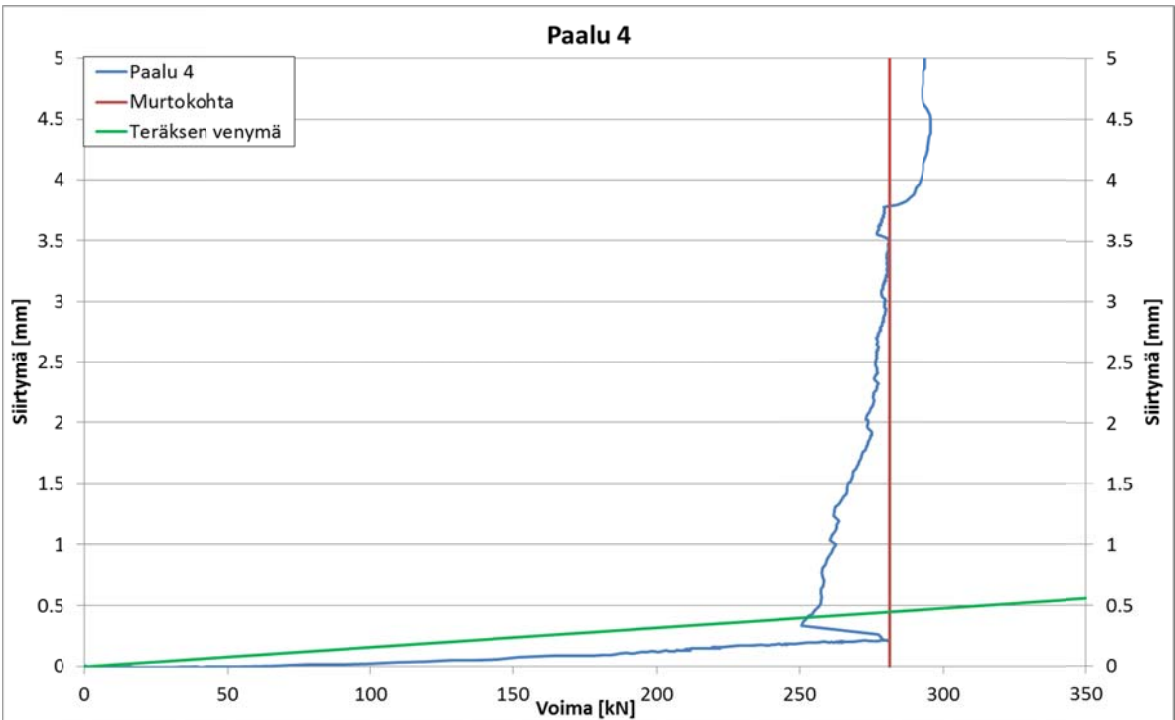
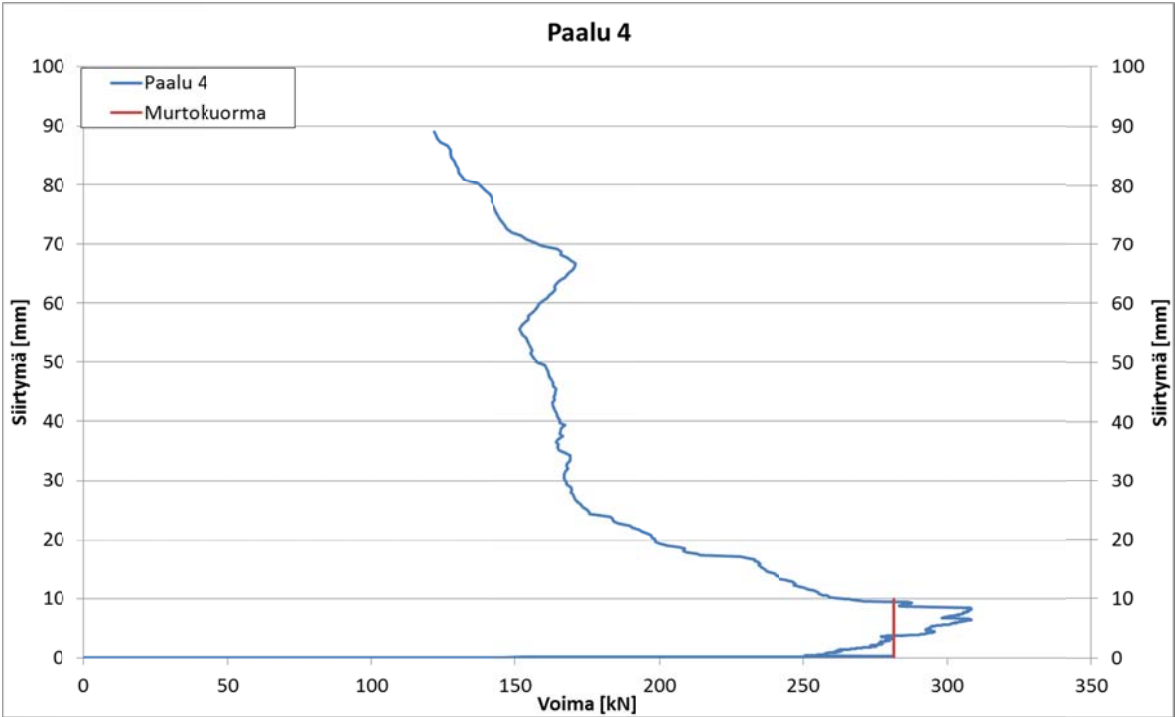


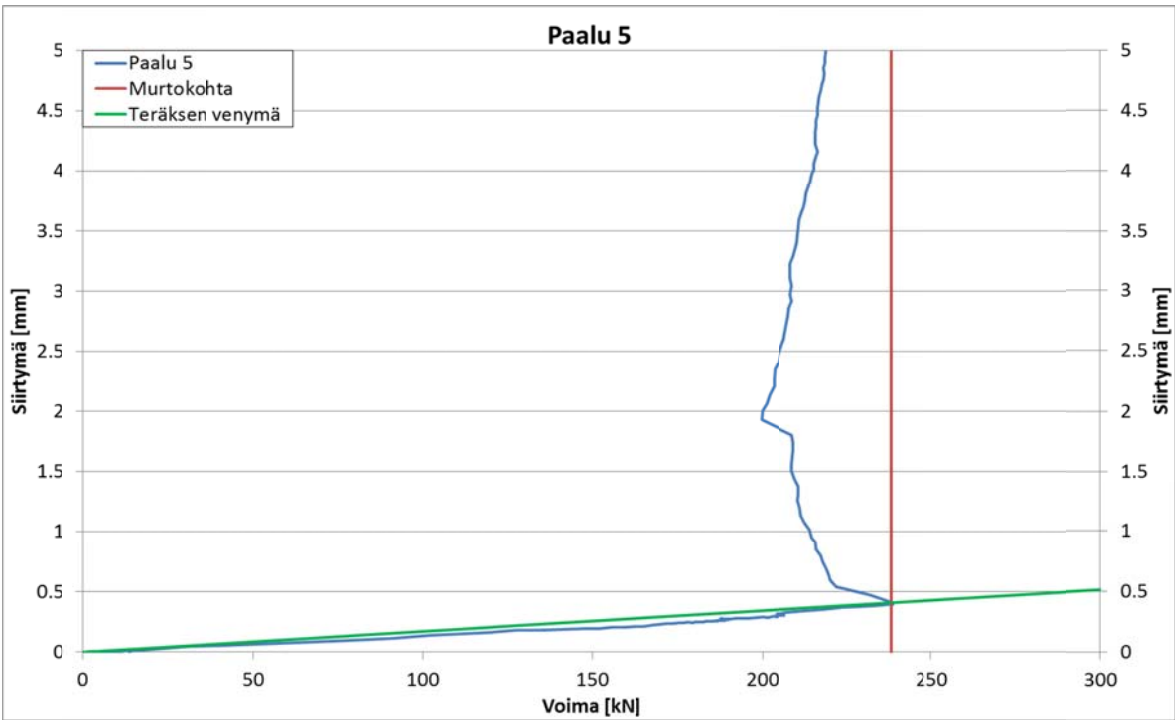
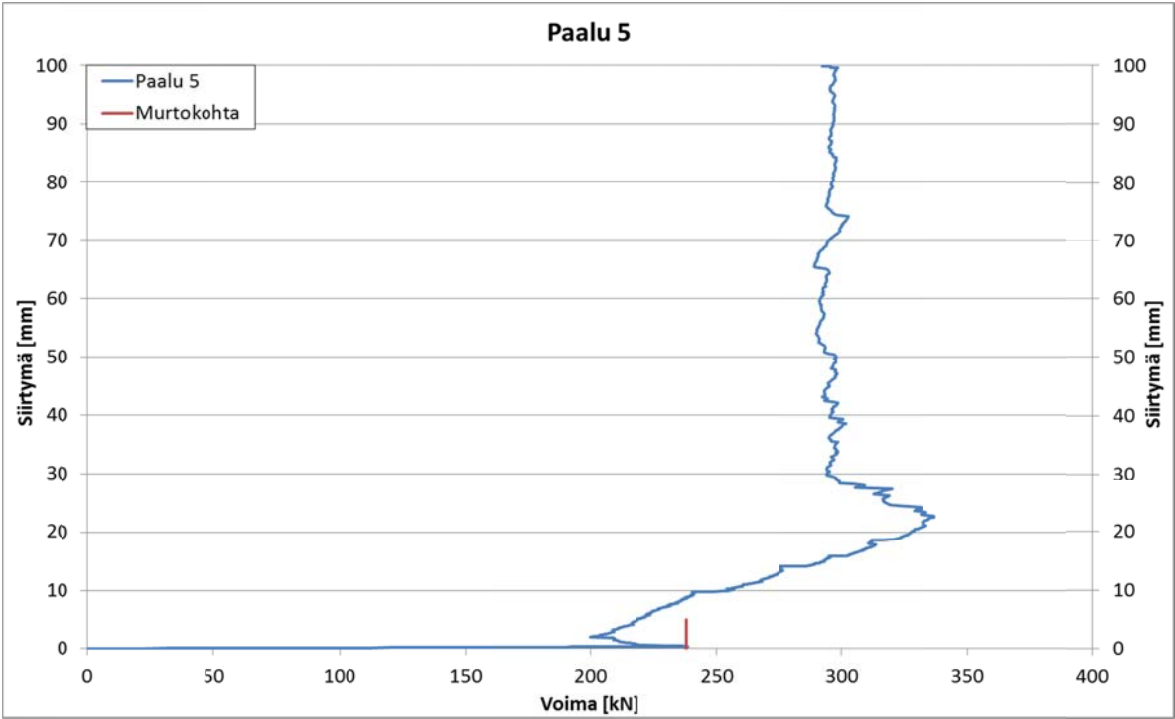
## Voima-siirtymä –kuvaajat

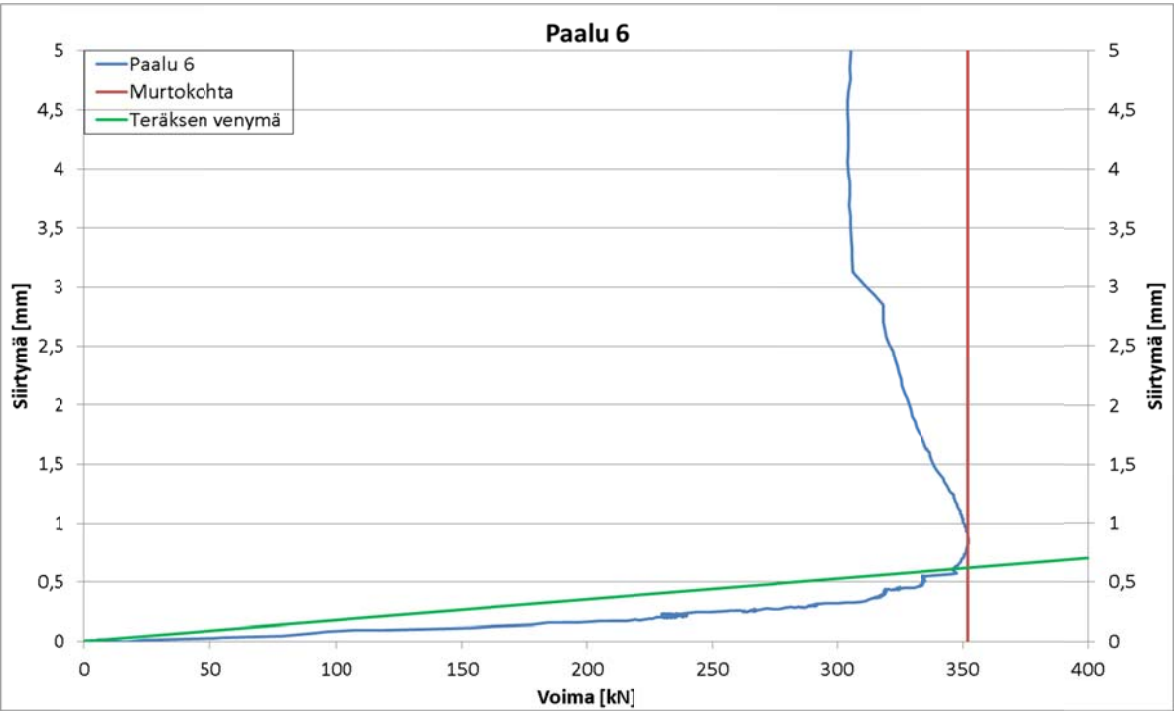
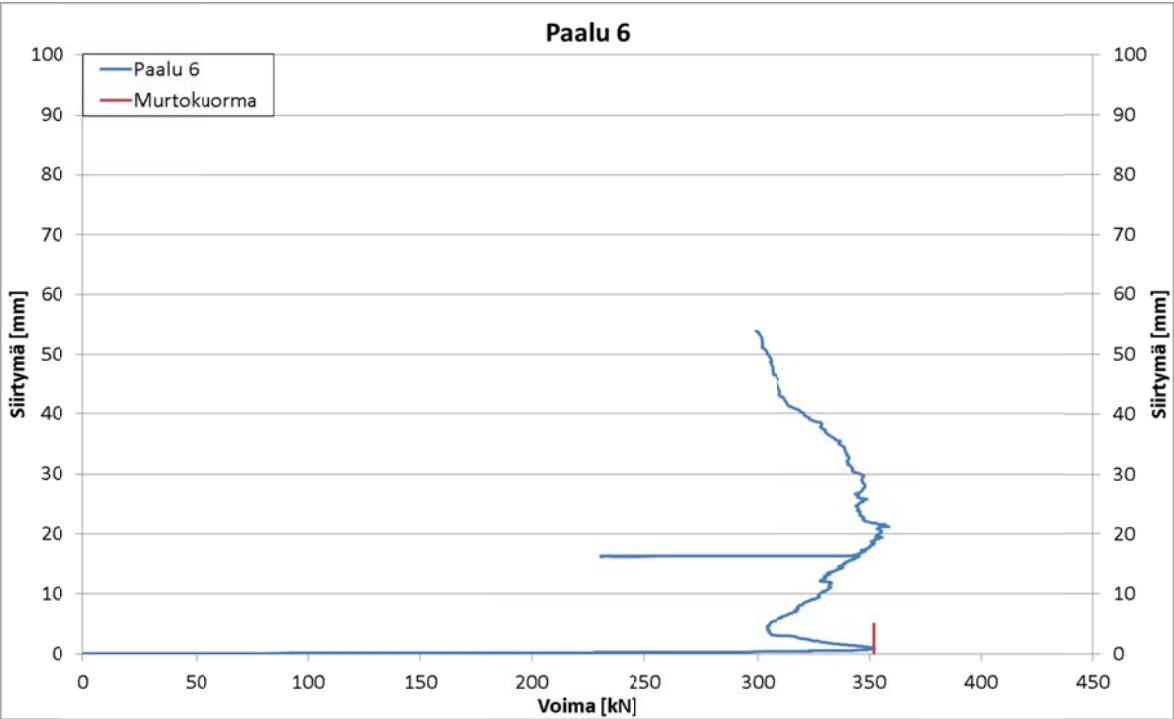




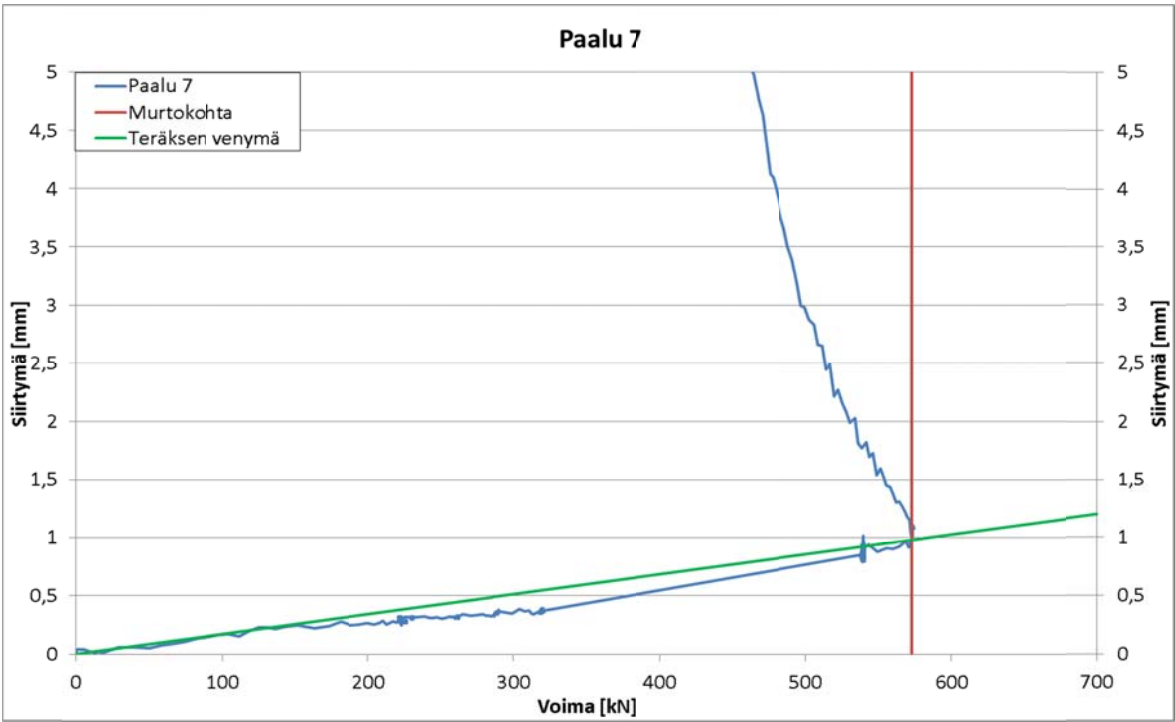
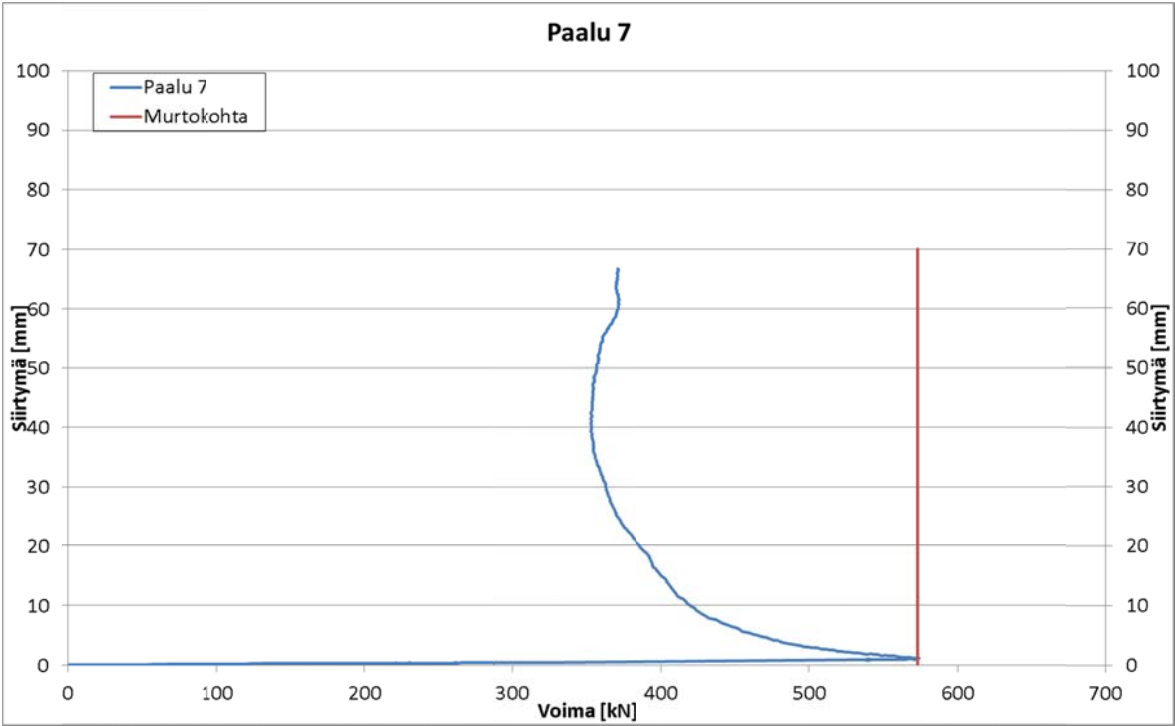


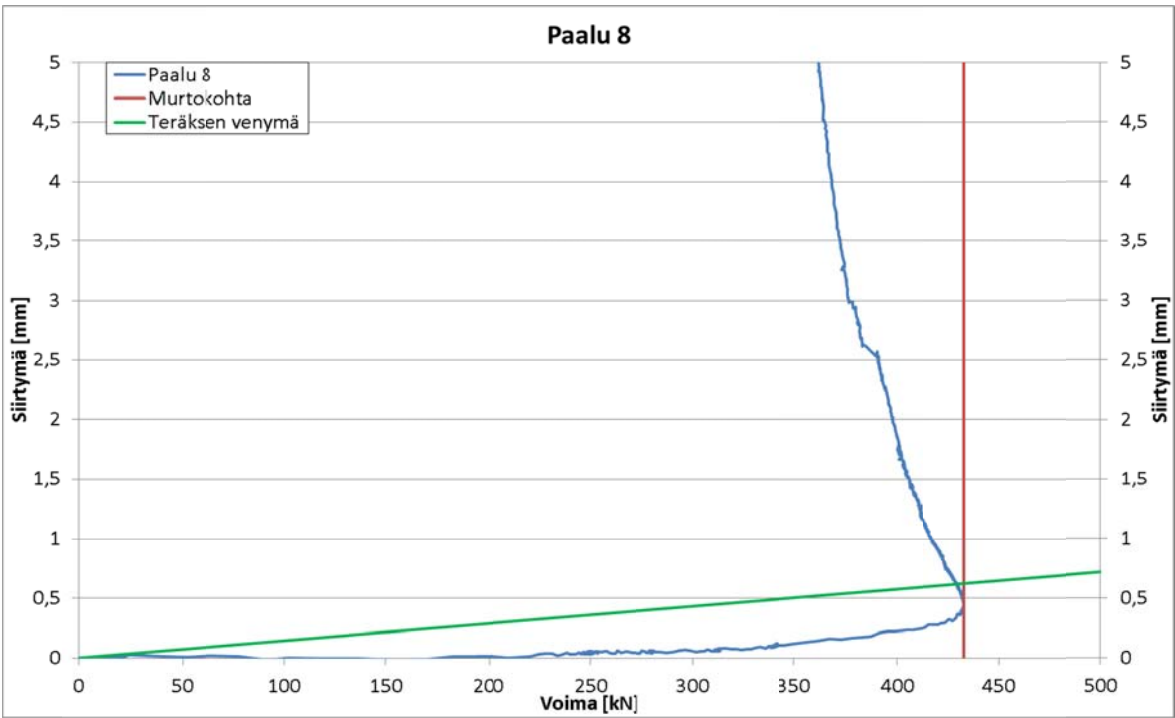
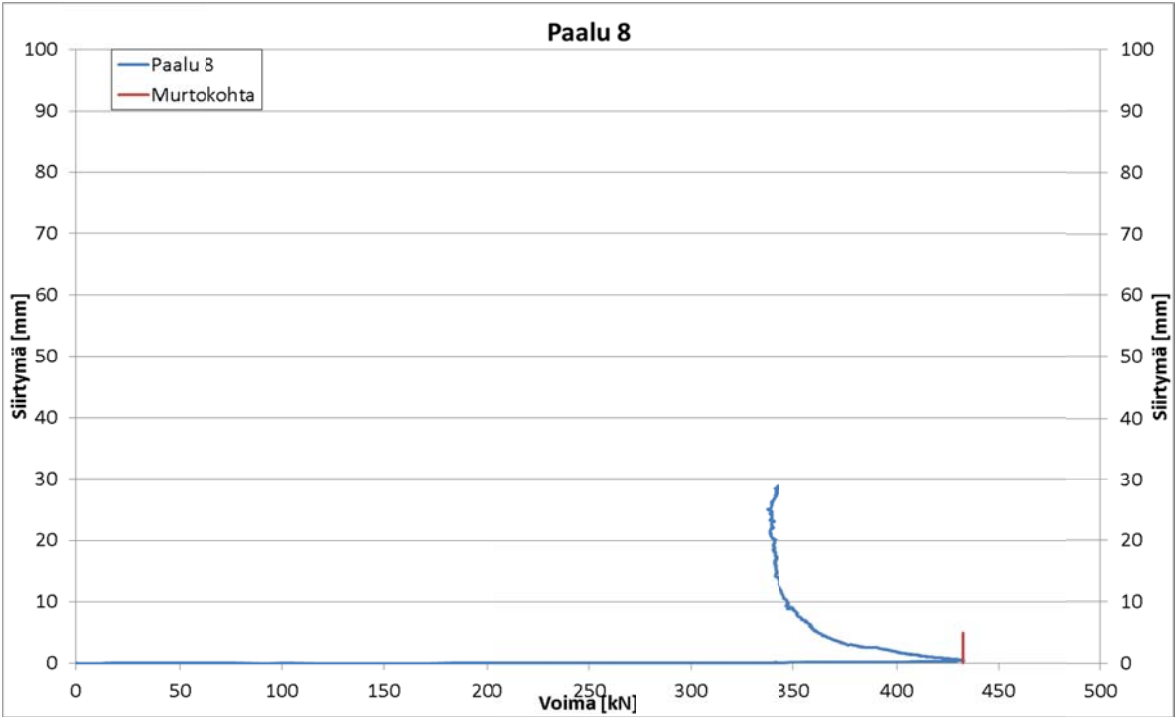


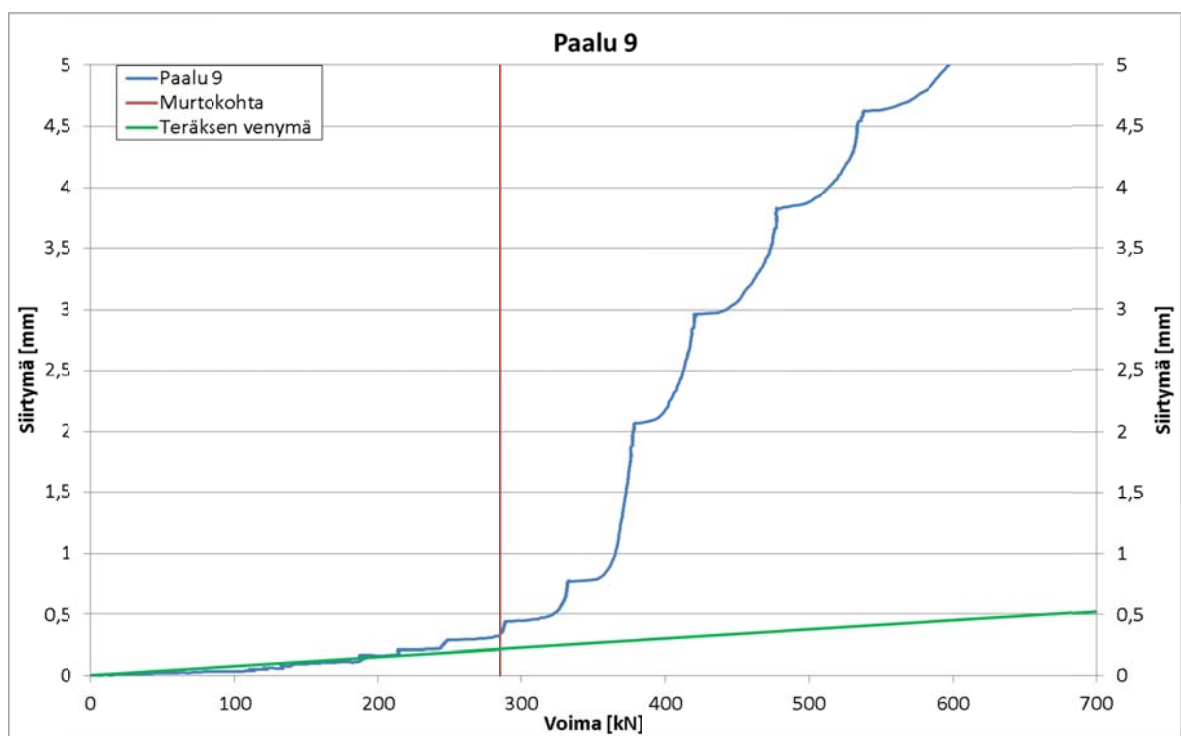
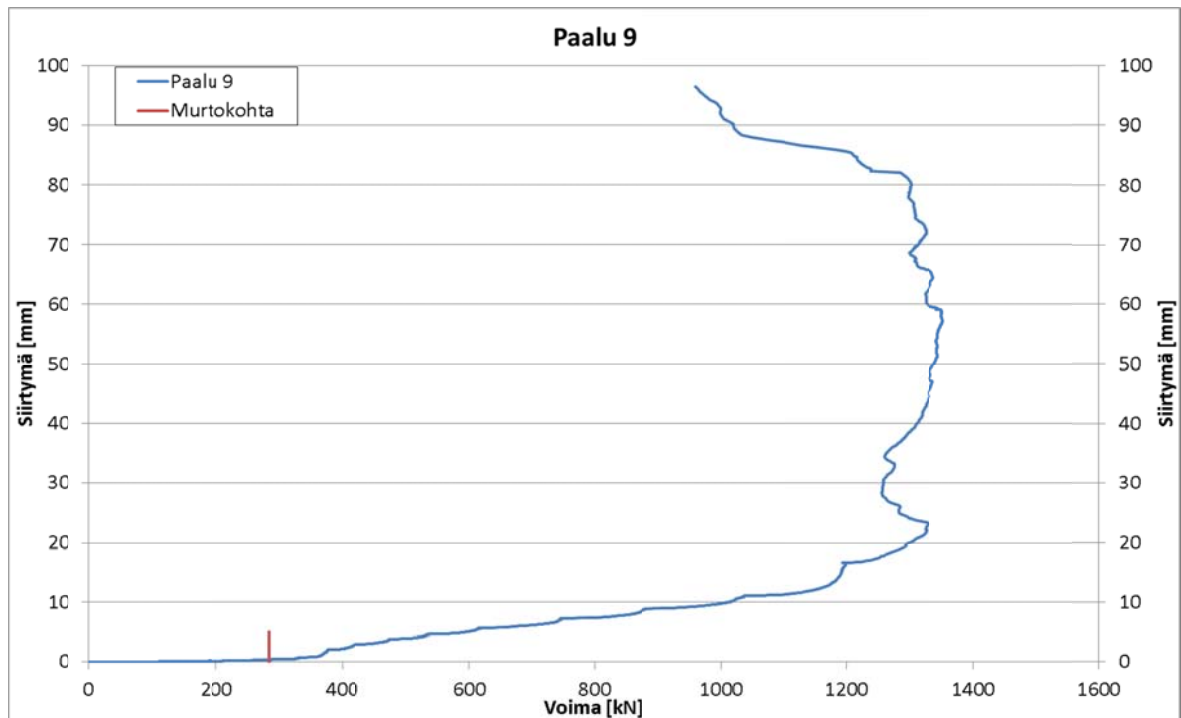


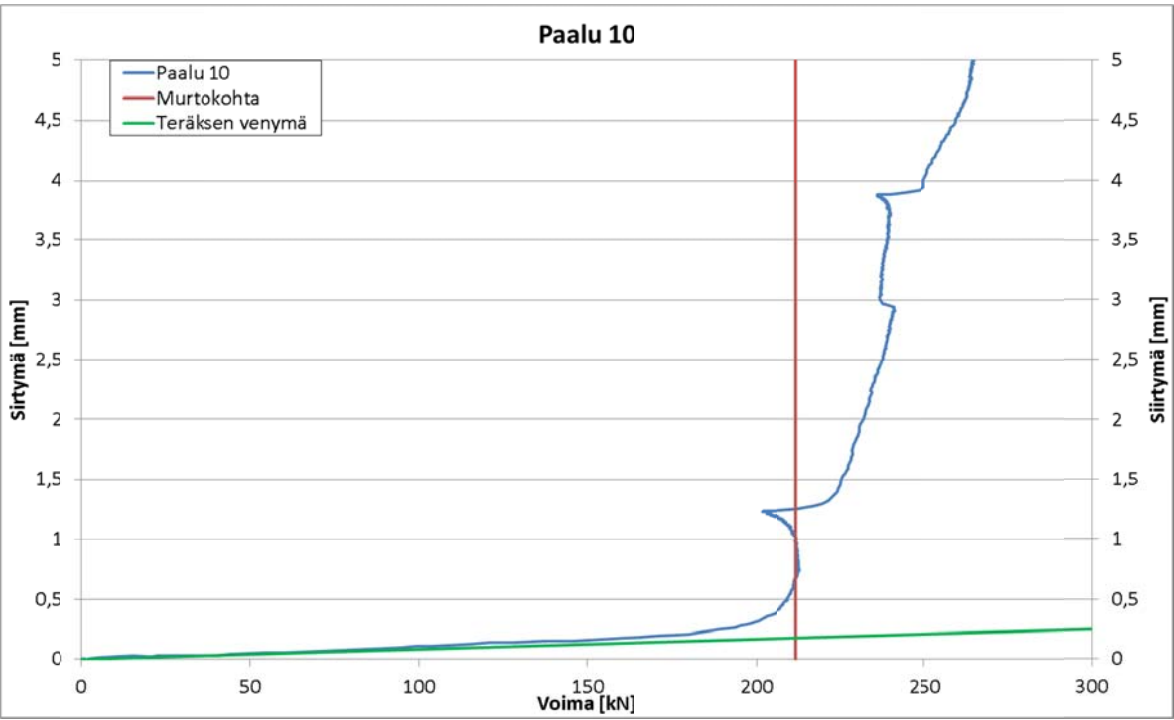
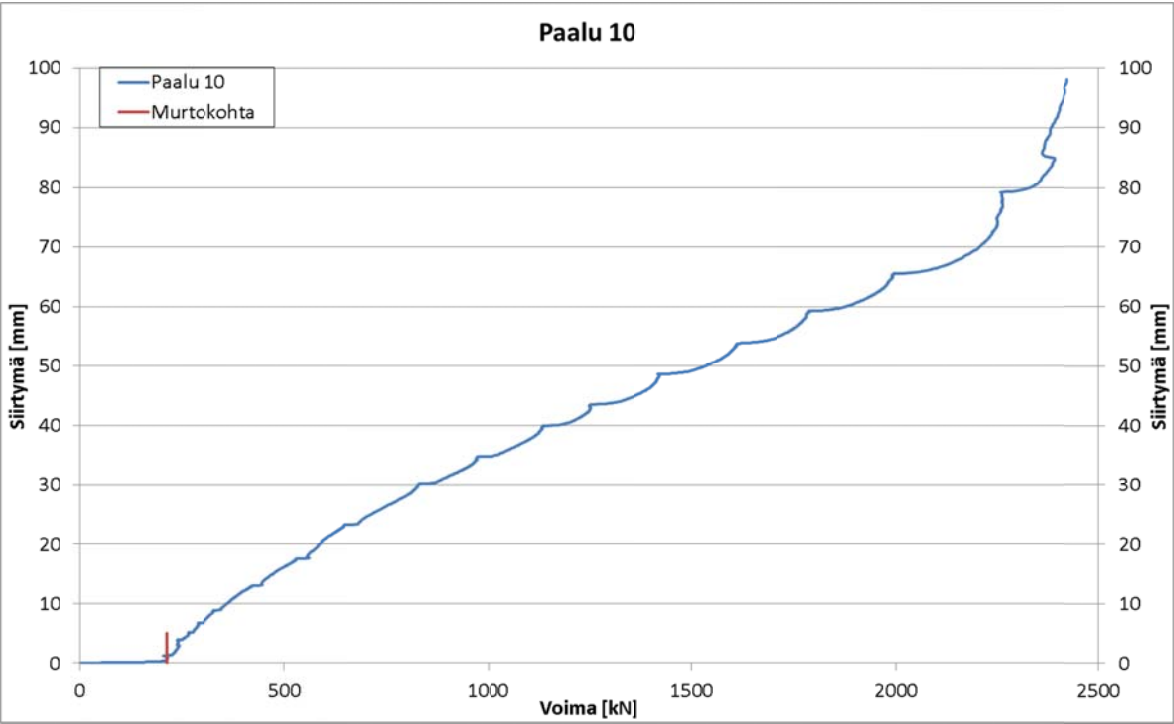


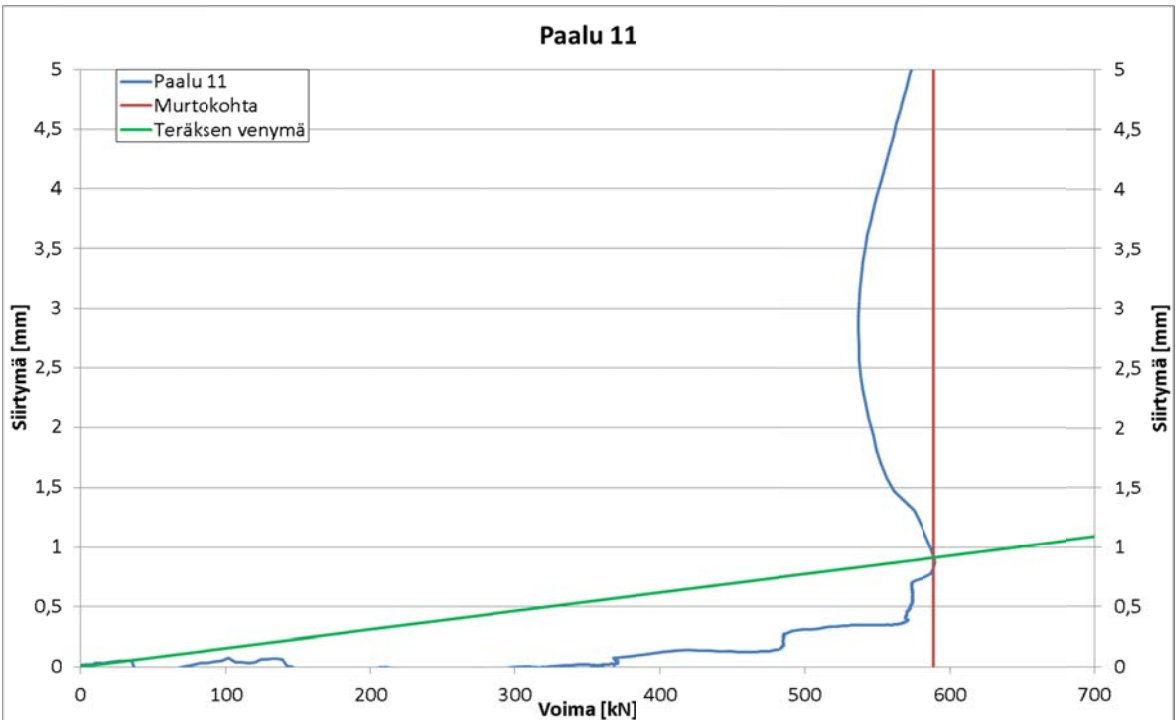
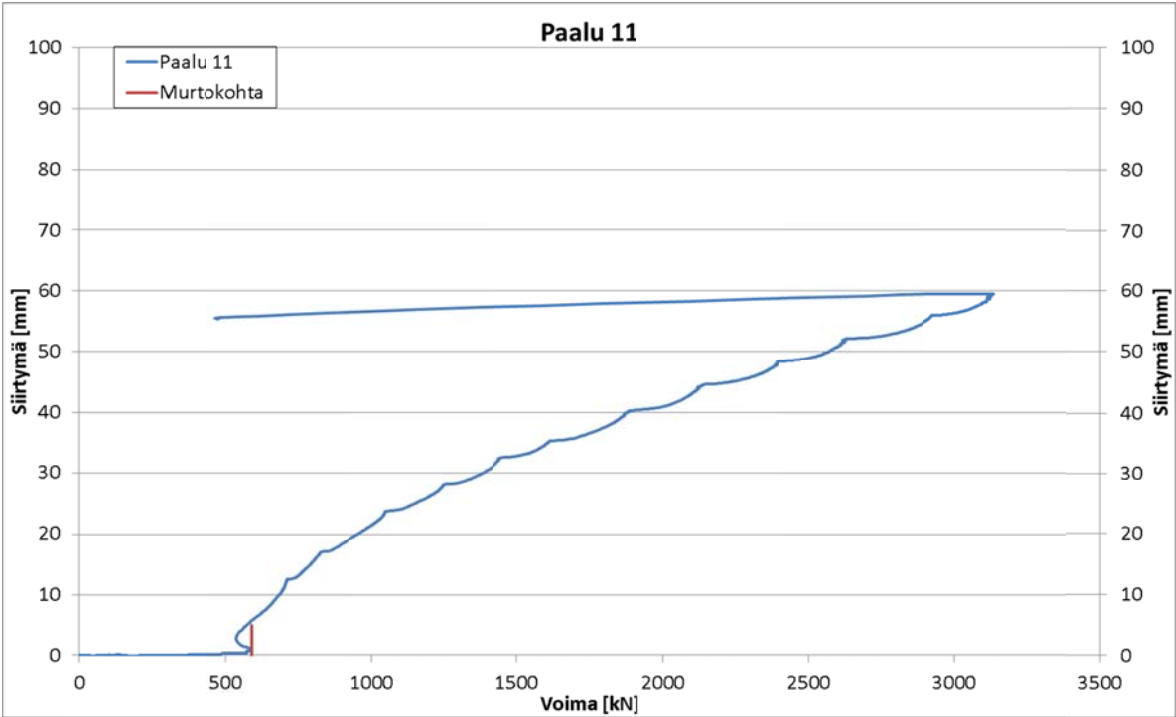


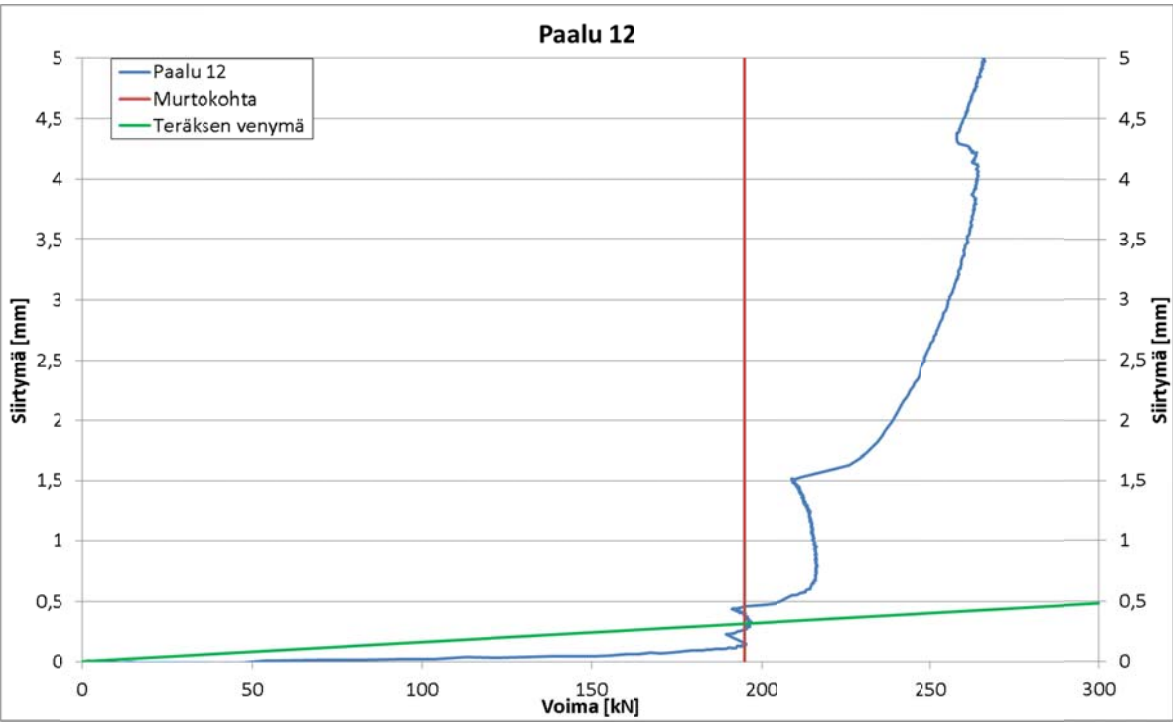
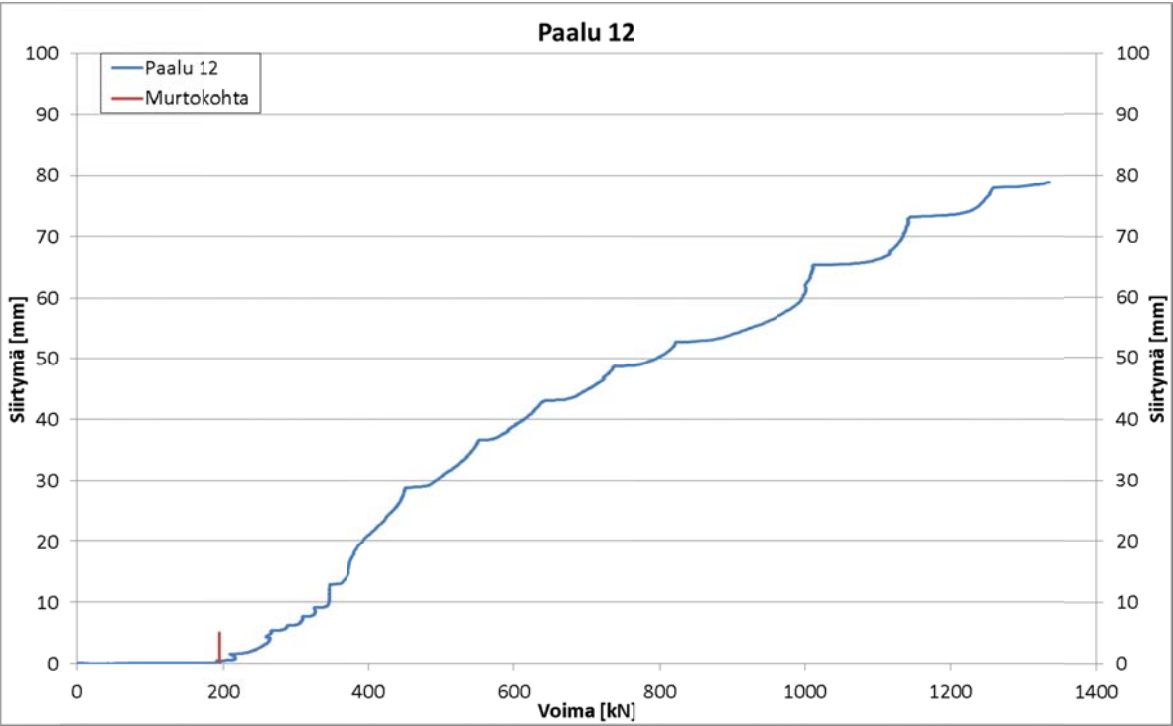


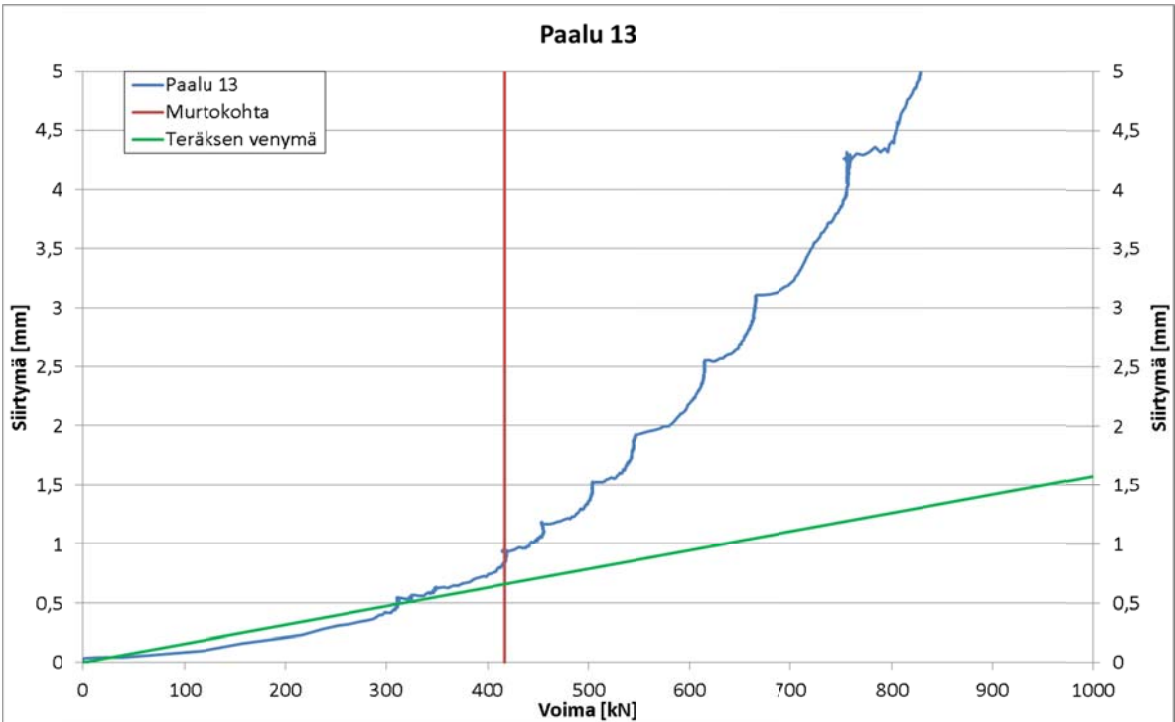
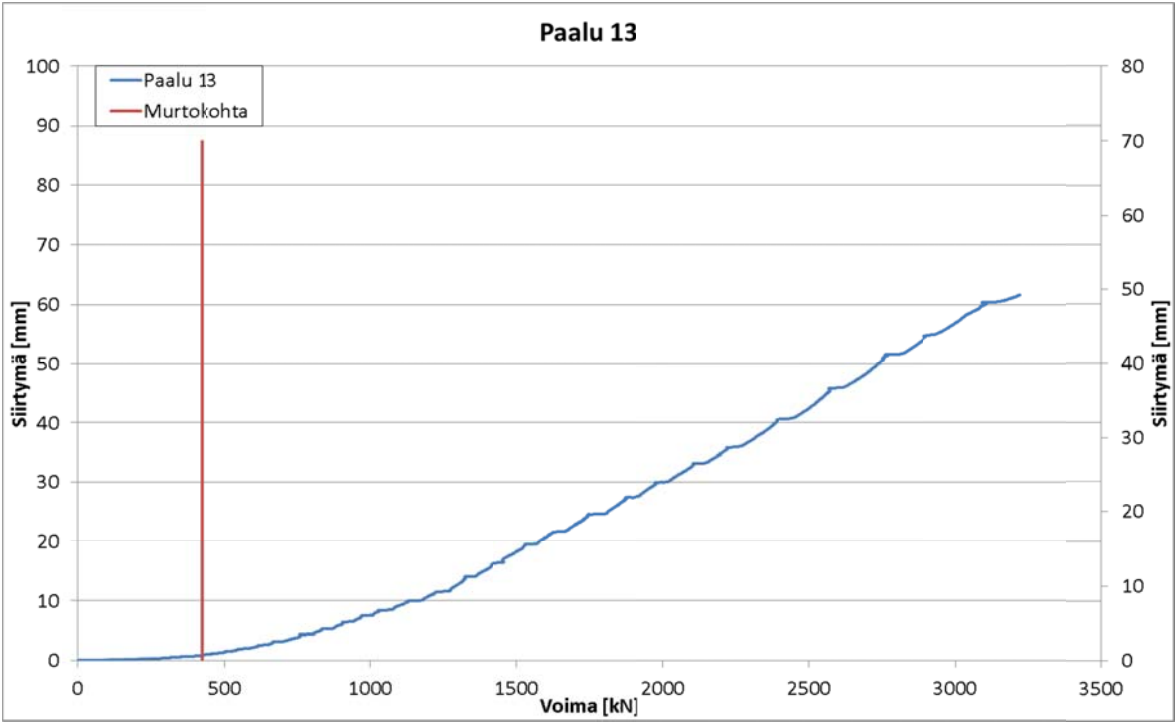


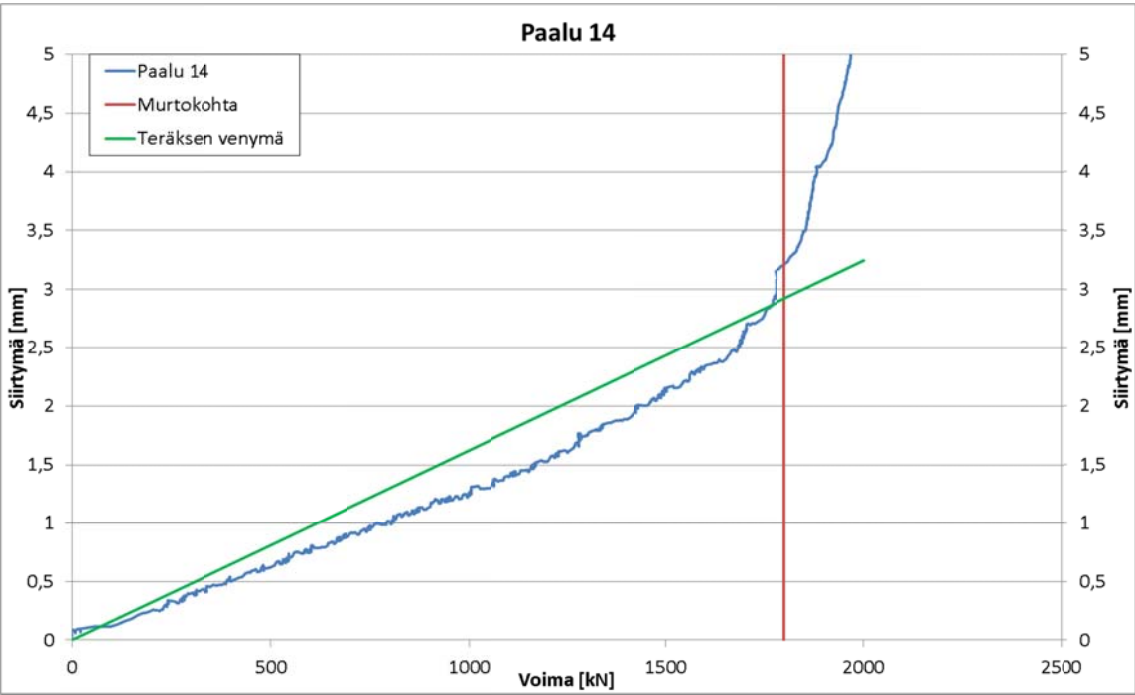
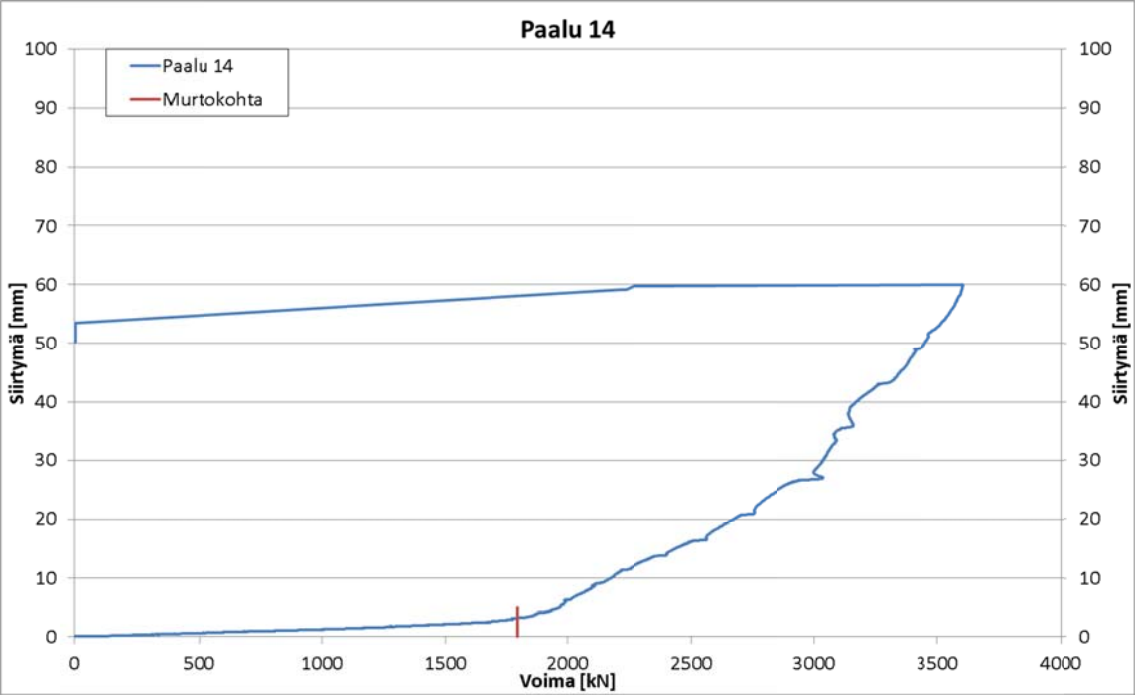




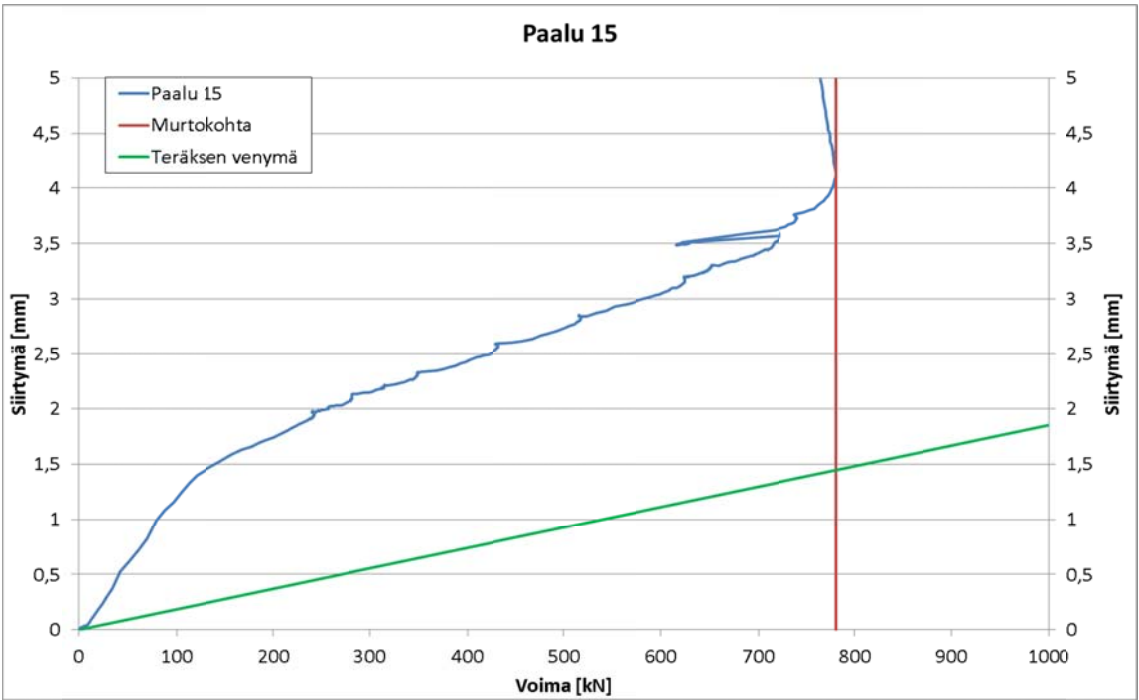
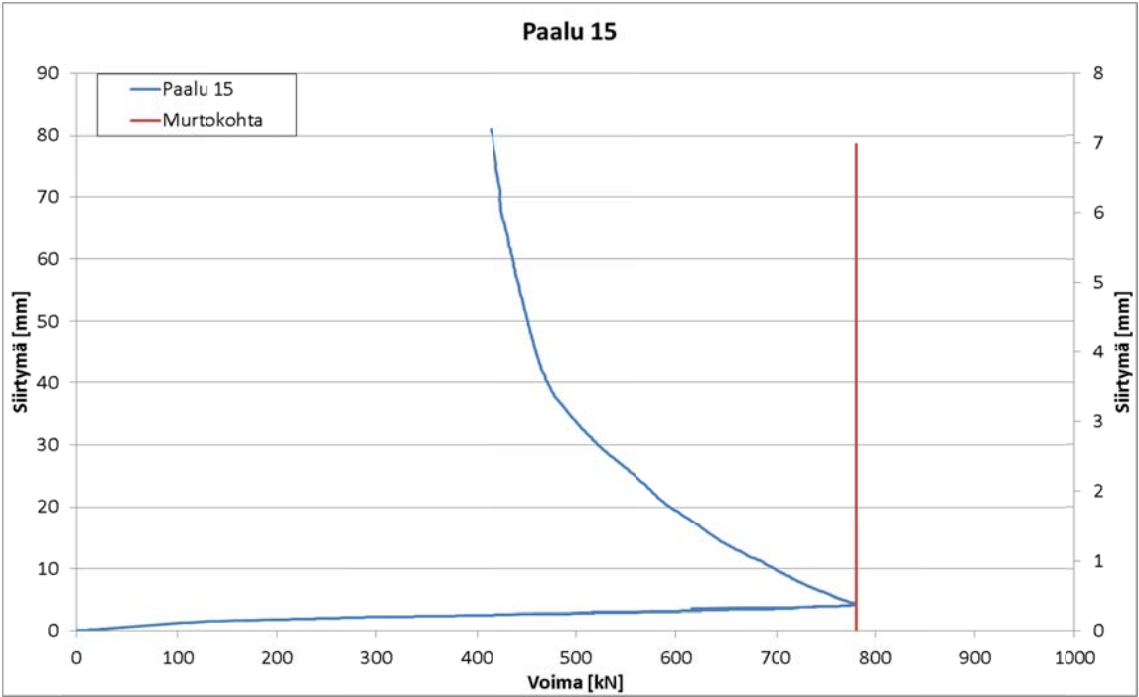














# Kallionpinnan siirtymät

(P = etäisyys paalusta pohjoisen suuntaan, E = etäisyys paalusta etelän suuntaan)

